

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky**

**Kombinace využití větrných a solárních elektráren v  
distribučních sítích.**

**Wind and solar power plants using in the distribution  
networks.**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Špaček**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Kombinace využití větrných a solárních elektráren v distribučních sítích.**  
**Wind and solar power plants using in the distribution networks.**

Zásady pro vypracování:

Technologie větrných a solárních zdrojů energie.

Rozbor stochastického provozu větrných a solárních zdrojů zapojených do distribučních sítí.

Zálohování větrných a solárních elektráren s možností akumulace energie.

Využití biomasy jako akumulační zdroj energie v elektrických distribučních sítích.

Seznam doporučené odborné literatury:

Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. Kniha Montanex 2009, ISBN: 978-80-7225-291-6.

Mastný, P.: Obnovitelné zdroje elektrické energie, Kniha ČVUT Praha 2011, ISBN: 978-80-01-04937-2.

Sborník EPE 2012 Brno - výběr referátů.


Janiček, F.: Obnovitelné zdroje energie - Bratislava 2009, ISBN: 978-80-89402-13-7.

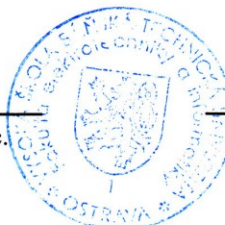
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Zdeněk Hradílek, DrSc.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 6. května 2013



.....  
Michal Špaček

## **Poděkování**

Touto formou bych chtěl poděkovat panu Prof. Ing. Zdeňku Hradílkovi, a Ing. Martinu Smočkovi za cenné rady, které mi poskytli během vypracování této práce.

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá problematikou větrných a solárních elektráren, které jsou připojeny do distribučních sítí. V úvodu jsou popsány jednotlivé technologie těchto zdrojů, které je potřeba znát pro jejich následnou analýzu. Další část této práce řeší akumulaci energie a její následné využití v odběrových špičkách. Záložní výkon je zde řešen formou biomasy, se zaměřením na bioplyn. Ten má významné postavení z pohledu rychlého záložního zdroje, který je schopen pokrýt odběrové špičky v denním diagramu. Hlavní cíl této práce spočívá ve vyhodnocení naměřených dat z reálné distribuční sítě, do které je připojena fotovoltaická elektrárna. Na vyhodnocených datech byla provedena simulace formou zálohy výkonu, za využití několika metod regulací.

## **Klíčová slova**

Solární elektrárna, větrná elektrárna, biomasa, bioplyn, regulace, distribuční síť, akumulace, negativní vlivy, stochastika.

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the problematice of the wind and solar powerstations plants connected to the distribution networks. The introduction describes each of these recourses technology needed to know for the subsquent analysis. Next part of this thesis deals with energy storage ans its subsequent use within the top offtake. Reserve power Backup power is solved by formo f biomass, focusing on biogas. It has a significant position in terms of rapid backup souce which is able to cover the the topped offtakes in the daily diagram. The main objective of this thesis is to evaluate the measured data from the real distribution network which has photovoltaic powerstation connected. On the basis of the evaluated data was made the simulation in advance of backup power, using several methods of control.

## **Key words**

Solar power, wind power, biomass, biogas, regulation, distribution network, storage, negative influences, stochastics.

## Seznam zkratek a symbolů

A	[m <sup>2</sup> ]	plocha
CH <sub>4</sub>	[1]	metan
CO <sub>2</sub>	[1]	oxid uhličitý
dB	[1]	decibel
E	[J]	energie
ES	[1]	elektrizační soustava
E <sub>K</sub>	[J]	energie kinetická
E <sub>P</sub>	[J]	energie potenciální
f	[Hz]	frekvence
FVE	[1]	fotovoltaická elektrárna
g	[m.s <sup>-2</sup> ]	tíhové zrychlení
h	[m]	výška
I	[A]	elektrický proud
I <sub>max</sub>	[W.m <sup>-2</sup> ]	intenzita záření
m	[kg]	hmotnost
MTP	[1]	měřicí transformátor proudu
MTN	[1]	měřicí transformátor napětí
NN	[1]	nízké napětí
OZE	[1]	obnovitelné zdroje energie
p	[Pa]	tlak
P <sub>i</sub>	[W]	instalovaný výkon
P <sub>FVE</sub>	[Wp]	výkon fotovoltaické elektrárny
PS	[1]	přenosová soustava
P <sub>V</sub>	[W]	výkon větru
PVE	[1]	přečerpávací vodní elektrárna
R	[Ω]	elektrický odpor
r	[m]	poloměr
S	[m <sup>2</sup> ]	plocha
t	[s]	čas
U	[V]	elektrické napětí
V	[m <sup>3</sup> ]	objem
v	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost
VE	[1]	větrná elektrárna
VN	[1]	vysoké napětí
VVN	[1]	velmi vysoké napětí
ρ	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota

Tyto symboly a zkratky jsou platné jen tehdy, není-li v příslušném textu uvedeno jinak. Jedná se především o symboly a zkratky označené stejným znakem nebo specifikované indexem.

## Obsah

<b>1. Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Technologie větrných a solárních zdrojů energie.....</b>	<b>2</b>
2.1 Technologie větrných elektráren .....	2
2.1.1 Energie větru .....	2
2.1.2 Větrné motory.....	6
2.1.3 Elektrická vybavení větrných elektráren .....	8
2.1.4 Regulace větrných elektráren .....	10
2.2 Technologie solárních elektráren.....	12
2.2.1 Využívání sluneční energie .....	13
2.2.2 Popis fotovoltaické technologie.....	13
2.2.3 Konstrukce fotovoltaického článku .....	16
2.2.4 Fotovoltaické panely.....	17
2.2.5 Zapojení fotovoltaických elektráren .....	18
2.2.6 Měniče .....	19
<b>3. Rozbor stochastického provozu větrných a solárních zdrojů, zapojených do distribučních sítí.....</b>	<b>20</b>
3.1 Klasifikace stochastiky .....	20
3.2 Koeficient využití .....	21
3.3 Extrémní případy FVE a VE.....	22
<b>4. Zálohování větrných a solárních elektráren s možností akumulace energie .....</b>	<b>23</b>
4.1 Možnosti akumulace.....	23
4.2 Možnosti akumulace v ČR.....	24
4.3 Princip denní akumulace.....	26
<b>5. Možnosti potlačení negativních vlivů v distribučních sítích.....</b>	<b>27</b>
5.1 Vzájemná spolupráce solární a větrné elektrárny .....	27
5.2 Vliv OZ na záloze pro regulaci frekvence předávaného výkonu.....	27
5.3 Změny napětí .....	28
5.4 Podpůrné a systémové služby .....	29
5.4.1 Činnost provozovatele přenosové soustavy.....	29
5.4.2 Systémové služby .....	30
5.4.3 Podpůrné služby .....	31
<b>6. Využití biomasy jako akumulační zdroj energie v elektrických distribučních sítích .....</b>	<b>32</b>
6.1 Biomasa .....	32
6.2 Srovnání jednotlivých zdrojů při výrobě elektrické energie za pomoci biomasy .....	35
6.3 Bioplyn .....	36
6.3.1 Vlastnosti.....	36
6.3.2 Zásobníky bioplynu .....	37
<b>7. Regulace výkonu biomasy.....</b>	<b>38</b>
7.1 Blokové schéma regulace solární elektrárny pomocí bioplynu .....	38
<b>8. Vyhodnocení regulace solární elektrárny v distribuční síti.....</b>	<b>40</b>

8.1	Regulace skoková „jednostupňová“ .....	44
8.2	Regulace skoková „dvoustupňová“ .....	46
8.3	Regulace skoková „vícestupňová“ .....	48
8.4	Regulace dynamická .....	51
8.5	Regulační výkon .....	53
8.5.1	Dopolední výkon .....	53
8.5.2	Večerní výkon .....	54
8.6	Aplikace s pomocí matematických funkcí .....	55
8.7	Srovnání jednotlivých metod .....	56
<b>9.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>58</b>
	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>60</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam grafů .....</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>63</b>



## 1. Úvod

V posledních letech se poukazuje na ochranu životního prostředí a s tím jsou spojeny obnovitelné zdroje. Při nasazování těchto obnovitelných zdrojů se setkáváme s různými problémy, které je nutno řešit. Jedním z nich je nestálost dodávaného výkonu a to je hlavní cíl, který řeší tato práce. Z hlediska obnovitelných zdrojů, se kterými se nejvíce setkáváme v České republice, jsou solární a větrné elektrárny. Technologie těchto dvou zdrojů je popsána v následující druhé kapitole, kde jsou podrobně popsány jednotlivé faktory, na kterých závisí především jejich vyráběný výkon. Dále tato kapitola popisuje technologické složení těchto zdrojů, regulaci, připojení k síti a ostatní problematiky, se kterými se setkáváme při provozu těchto zdrojů.

Třetí kapitola popisuje stochastický provoz solárních a větrných elektráren, které jsou zapojeny do distribuční sítě. Zde je vysvětleno, co je to stochastika a s jakými druhy stochastiky se můžeme nejčastěji setkat u obnovitelných zdrojů. Další zajímavou částí v této kapitole je koeficient využití a extrémní případy těchto obnovitelných zdrojů.

Následující část řeší zálohování výkonu. Jsou zde popsány jednotlivé druhy akumulátorů výkonu, které jsou následně zhodnoceny z hlediska velikosti výkonu, účinnosti, životnosti, investice a ostatních důležitých kritérií. Ukázkou aplikace využití této akumulace energie využijeme modelu České republiky. Zde je vysvětlen princip akumulace v období přebytku výkonu a posléze jeho následné využití v období nedostatku.

Negativní vlivy obnovitelných zdrojů v distribuční síti lze částečně potlačit i jinými metodami, než je akumulace výkonu. Ty jsou popsány v šesté kapitole. Jednou z nich je vzájemná spolupráce solární elektrárny s větrnou. Další část této kapitoly řeší nastavování distribučních transformátorů podle žádaných hodnot, a to zejména z hlediska změny napětí. Na závěr jsou popsány podpůrné a systémové služby, kde je vysvětleno jejich využití v praxi.

Šestá kapitola se zabývá zálohovat výkon a to za využití biomasy. V této části je vysvětlena biomasa z pohledu energetického potenciálu. Dále jsou zde posouzeny možné technologie výroby elektrické energie za pomoci využití biomasy.

Předposlední kapitola řeší regulaci výkonu za pomoci biomasy. Regulace je vysvětlena za pomoci blokového schéma, které konkrétně popisuje solární elektrárnu s kombinací bioplynové elektrárny.

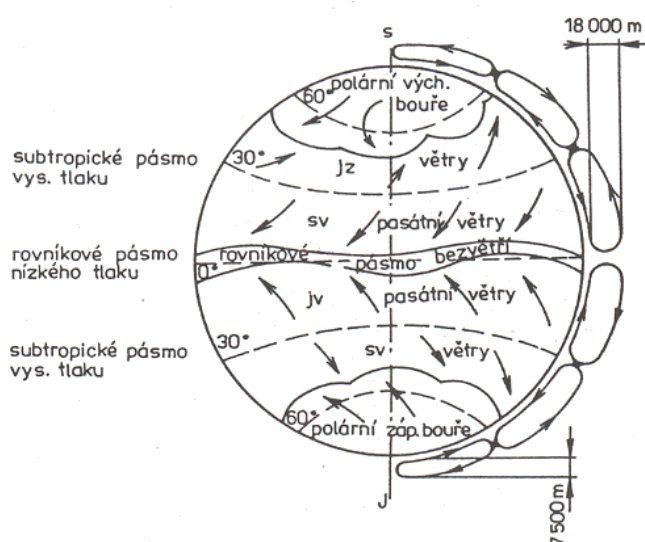
V poslední části této práce jsou vyhodnoceny změřená data z konkrétní distribuční sítě, do které je připojena fotovoltaická elektrárna. Na vyhodnocených datech sítě, je provedena simulace záložního výkonu. Ta je řešená z pohledu několika metod regulace výkonu, kterými je jednostupňová, dvoustupňová, vícestupňová, dynamická a pomocí matematické funkce. V poslední části této kapitoly jsou zhodnoceny jednotlivé metody.

## 2. Technologie větrných a solárních zdrojů energie

### 2.1 Technologie větrných elektráren

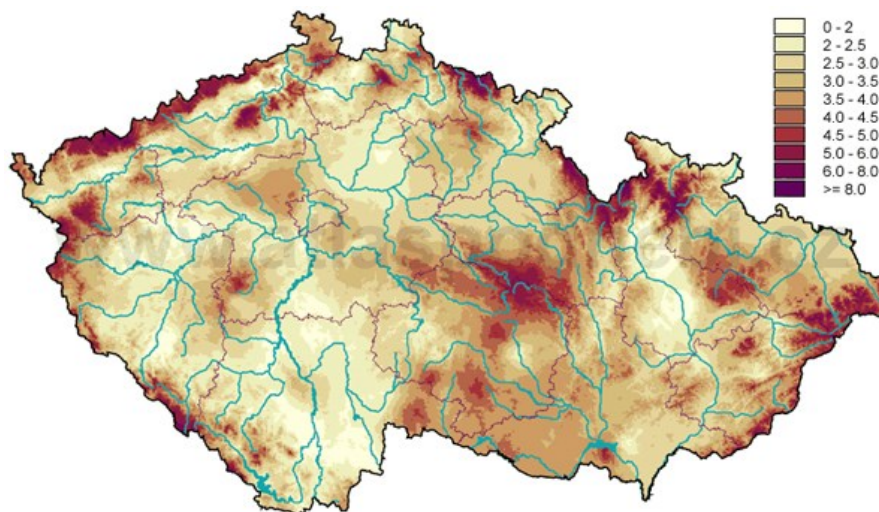
#### 2.1.1 Energie větru

Vítr vzniká vlivem nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu slunečním zářením. Od ohřátého povrchu se ohřívá přilehlá vrstva vzduchu a teplý vzduch má tendenci vstoupat vzhůru. Celý děj je silně ovlivněn rotací Země a střídáním dne a noci, což má za následek vzniku tlakových rozdílů v zemské atmosféře. Vyrovnáním tlakových rozdílů vzniká vítr, který vane od tlakové výše k tlakové níži. Kolem tlakové níže ne severní polokouli jde spinální pohyb proti směru hodinových ručiček, u tlakové výše ve směru hodinových ručiček. Na jižní polokouli je smysl rotace u tlakové výše a níže opačný. [1]



Obr. 2.1: Princip vzniku větru [1]

Naše země je vnitrozemský stát s typicky kontinentálním klimatem, které se projevuje významným sezónním kolísáním rychlostí a směru větru (turbulence). Důsledkem vzniku větru je zejména globální vzdušné proudění, které je typické pro severní a střední Evropu. Průměrné roční rychlosti větru v České republice jsou vyznačeny na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Průměrné roční rychlosti větru na jednotlivá místa v ČR [3]

Při posuzování energie větru je nejdůležitějším parametrem jeho rychlost, ta se udává se v  $\text{m.s}^{-1}$  a je závislá na několika faktorech. Čím je povrch rovnější, tím je vzrůstá rychlost větru. Členitost terénu a překážky v cestě proudění (stavby, kopce...) rychlost větru zpomaluje. Také druh povrchu (tráva, les, vodní hladina, sníh apod.) mají určitý vliv. Dalším faktorem, který ovlivňuje rychlost větru je nadmořská výška – s jejím nárůstem se rychlost větru zvyšuje. Je velký rozdíl rychlostí větru mezi výškami 10 m a 100 m nad terénem. Pro praktické využití energie větru jsou zajímavé výšky od 40 m nad zemským povrchem.

Rychlost větru pro rovinné plochy se dá spočítat následovně.

$$\frac{v^*}{v_0^*} = \left( \frac{h}{h_0} \right)^n \quad (2.1)$$

Kde:

- $v^*$ .....průměrná rychlost větru ve výšce  $h$  nad zemským povrchem,  
 $v_0^*$ .....průměrná rychlost větru ve výšce  $h_0$ ,  
 $n$ .....drsnost povrchu (tabulka 2.1).

Typ povrchů	$n$
hladký povrch	0,14
louka s nízkým, travnatý porostem	0,16
vysoká tráva, nízké obilné porosty	0,18
porosty vysokých kulturních plodin	0,21
lesy	0,28
vesnice a malá města	0,48

Tab. 2.1: Typy povrchů

Energie větru lze vyjádřit pohybující se hmotou vzduchu, která se skládá z kinetické a potenciální energie (2.2).

$$E = E_K + E_P \quad (2.2)$$

Kde E je celková mechanická energie,  $E_K$  je kinetická energie a  $E_P$  je potenciální energie. Kinetická energie  $E_K$  se skládá z hmoty m a kvadrátu rychlosti  $v^2$ . Potenciální energie  $E_P$  je přímo úměrná hmotnosti m, gravitačnímu zrychlení g a výšce h.

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.3)$$

$$E_P = m \cdot g \cdot h \quad (2.4)$$

Při výpočtu energie větrného motoru se zanedbává potenciální energie. Kdy celková mechanická energie se skládá pouze z kinetické energie.

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2.5)$$

Pro hmotu m platí vztah

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \quad (2.6)$$

Z předchozích rovnic se odvodí vztah pro energii větru,

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot v^2 \quad (2.7)$$

Za použití vztahu pro průměrný výkon (2.7), lze určit vztah pro výkon protékající jednotkovou plochou, kde  $P_V$  je výkon vztažen na jednotkovou plochu, E energie větru, A plocha a t čas.

$$P = \frac{E}{t} \quad (2.8)$$

$$P_v = \frac{E}{A \cdot t}$$

(2.9)

Při dosazení vztahu (2.4) do rovnice pro energii větru (2.9) a následnou úpravou dostaneme následující vztah:

$$P_v = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot v^2}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot v^2}{t}$$

(2.10)

Výpočty nejsou počítány v okamžitých hodnotách, ale v průměrných, kdy lze použít tento vztah:

$$v = \frac{s}{t}$$

(2.11)

Pokud rovnice (2.11) se dosadí do vztahu (2.10), tak se získá vztah pro výpočet výkonu na jednotkovou plochu. Ten je přímo úměrný hustotě vzduchu a třetí mocnině rychlosti vzduchu.

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3$$

(2.12)

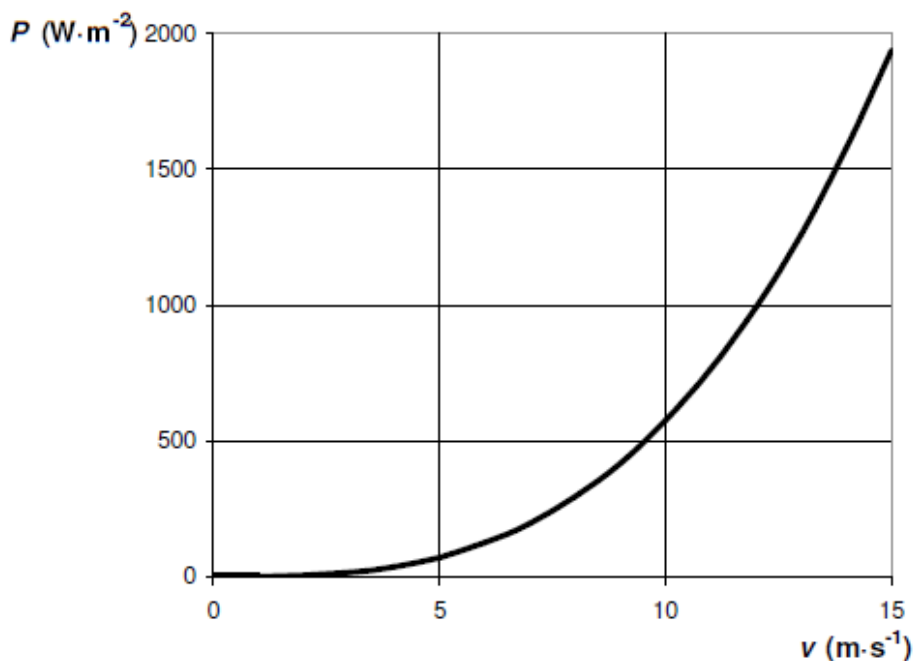
Kde  $\rho$  je hustota větru v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a  $v$  rychlost větru v  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  tzv. výkon působící na plochu 1  $\text{m}^2$ . Při uvažování hustoty vzduchu  $\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , lze vykreslit graf výkonu (graf: 2.1). Z grafu je možné pozorovat, že výkon roste s třetí mocninou rychlosti větru. Při vynásobení předchozího vztahu plochou rotoru  $A_v$ , dostaneme obecný vztah pro výpočet výkonu větrného motoru  $P_v$  (2.13).

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot A_v \cdot \rho \cdot v^3$$

(2.13)

Kde:

$P_v$  (W).....výkon větrného motoru,  
 $A_v$  ( $\text{m}^2$ )..... plocha rotoru větrného motoru,  
 $\rho$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )..... hustota vzduchu,  
 $v$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )..... rychlost vzduchu.



Graf. 2.1: Závislost výkonu větru na jeho rychlosti

### 2.1.2 Větrné motory

Hlavní a nejdůležitější částí větrné elektrárny je větrný motor, který slouží k přeměně kinetické energie větru na mechanickou energii. Větrné motory se dají dělit hned podle několika hledisek. Prvním základním hlediskem je aerodynamický princip, pomocí kterého lze rozdělit na:

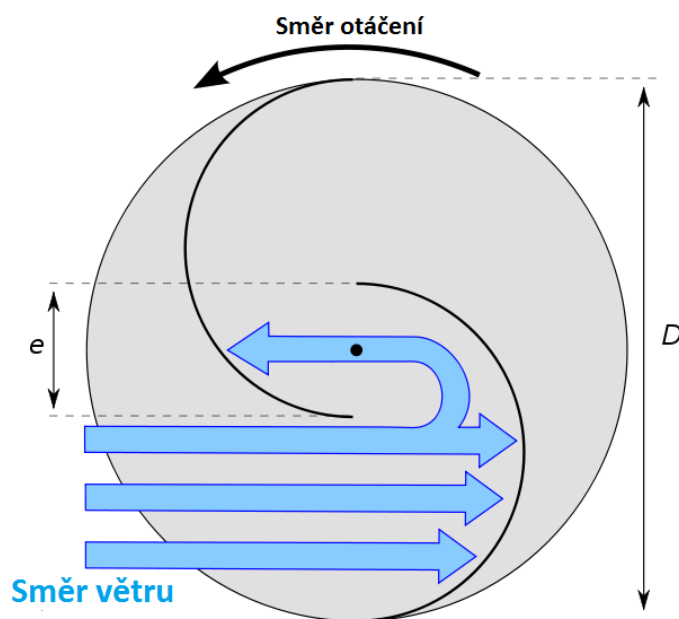
- motory odporové,
- motory vztlkové.

#### Větrné motory odporové

Tyto motory patří mezi nejstarší typ větrných motorů. Princip těchto motorů spočívá v nastavování ploch lopatek kolmo k větru a vytváří aerodynamický odpor. Plocha aerodynamického odporu zpomaluje tok větru a na plochu tak působí síla, která je přeměňována na rotační pohyb. Podmínkou vzniku hnacího momentu je obvodová rychlost, která musí být vždy menší, než rychlost větru.

S motory tohoto typu se moc často nesetkáváme a to z toho důvodu, že pracují s nižší účinností v rozsahu 15 až 23 %. Nejčastěji se setkáváme s motory typu Savoniův, který je tvořen dvojicí či trojicí lopatek polokruhovitě nebo ledvinovitě tvaru. Vnitřní okraje lopatek zasahují až za střed rotoru a to v rozsahu 20 % průměru rotoru (obrázek 2.3). To umožňuje průtok média mezi jejich zadními stranami. Osa otáčení je kolmá na směr proudění. Konstrukce tohoto motoru je velice jednoduchá na výrobu a z tohoto důvodu se tato větrná varianta často používá. Pokud je větrná turbína typu Savoniova zkonstruována se svislou osou, pracuje nezávisle na směru větru. Nevýhodou dvoulopatkové Savoniovy turbíny je existence mrtvého úhlu. To se dá vyřešit spojením několika rotorů s různě natočenými lopatkami, nebo šroubovitým tvarem lopatek. Naopak

velkou výhodou tohoto typu motoru je, využívání rychlost větru již od  $2 \text{ m.s}^{-1}$ . Nevýhodou je malá rychloběžnost, nízké otáčky, vysoké hodnoty točivého momentu a nízký součinitel využití energie větru.

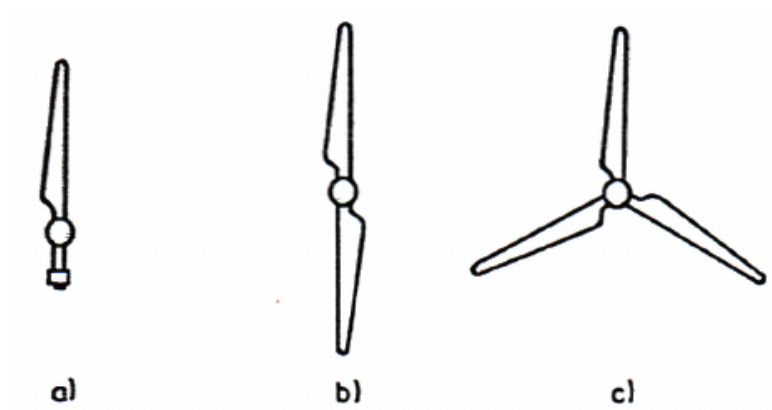


Obr. 2.3: Savoniův větrný motor

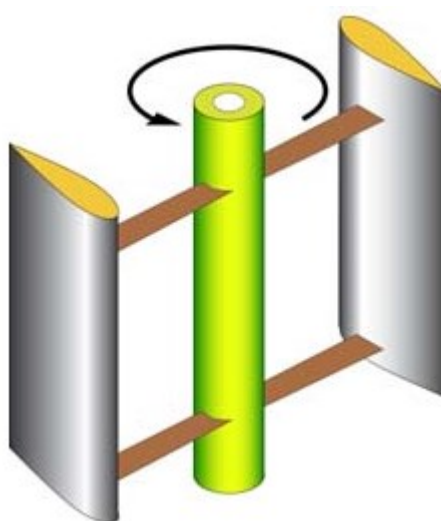
### **Větrné motory vztlakové**

S větrnými motory, které pracují na principu vztlakovém, se setkáváme nejčastěji. Jejich osa otáčení je horizontální, kdy rovina otáčení je kolmá ke směru větru. Tyto větrné motory jsou konstruované jako jednolisté, dvoulisté, třílisté a víceleté (obr 2.1). Mezi zástupce víceletého větrného motoru patří americké kolo. Nejvíce vyráběné větrné motory jsou třílisté. Je možné se také setkat se vztlakovými motory s vertikální osou otáčení, mezi které patří motor Darrieus. Ten bývá v dvoulistém, třílistém i čtyřlistém provedení (obrázek 2.5).

Mezi nejvíce rozšířené patří rychloběžné větrné motory, které se vyznačují vysokou účinností oproti ostatním a to více jak 40 %. Obvodová rychlost konců lopatek může u tohoto typu motoru dosahovat dvou až desetinásobku rychlosti větru. Nevýhodou těchto motorů je špatná rozbíhavost, při nízkých rychlostech větru. Většinou se tyto motory rozbíhají při rychlostech  $5 \text{ m.s}^{-1}$ . Naopak velkou výhodou je jejich dobré využití pro výrobu elektrické energie.



Obr. 2.4: Vztlakové motory a) jednolisté, b) dvoulisté a c) třílisté provedení [3]



Obr. 2.5.: Větrný motor Darrieus [4]

### 2.1.3 Elektrická vybavení větrných elektráren

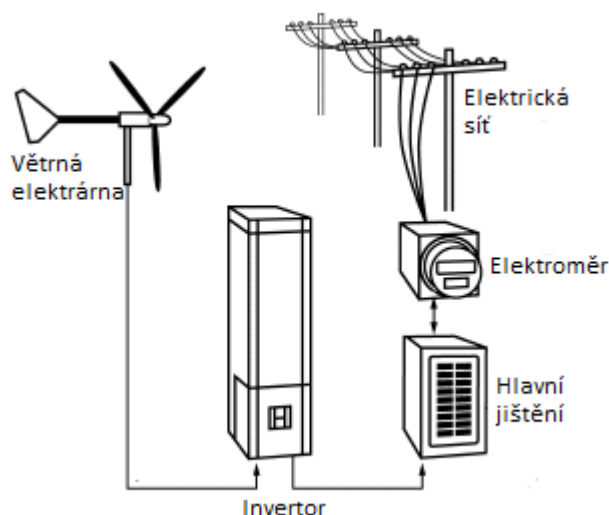
Hlavní část vybavení větrných elektráren patří generátor. Většinou se používají asynchronní a synchronní generátory. Nejvíce se používají asynchronní generátory. U nás v České republice jsou pouze dvě velké větrné elektrárny, které mají synchronní generátor. Všechny ostatní velké větrné elektrárny využívají k výrobě elektrické energie asynchronní generátor.

Asynchronní generátor se vyznačuje menší konstrukční a finanční náročností. Z hlediska provozu je spolehlivější. Jeho velkou výhodou je jednoduchý rozběh a následné připojení do sítě. Naopak synchronní generátor se musí provozovat v synchronních otáčkách. Z důvodu velké proměny rychlosti větru má hřídel rotoru rozdílné otáčky a proto se vyrobená elektrická energie ze synchronního generátoru usměrní usměrňovačem a střídačem se upraví na požadovanou hodnotu frekvence sítě.



### **Větrné elektrárny malých výkonů**

Do kategorie malých větrných elektráren patří elektrárny s výkonem do 10 kW. Tyto elektrárny většinou obsahují více pólové synchronní generátory. Malé větrné elektrárny neobsahují regulátory otáček, kdy bývají doplněny o usměrňovač a střídač. Pro možnost spolupráce malé větrné elektrárny se sítí, musí obsahovat základní prvky, kterými je inverter, jističní a měření elektrické energie. Zjednodušené schéma je zobrazeno na obrázku 2.6.

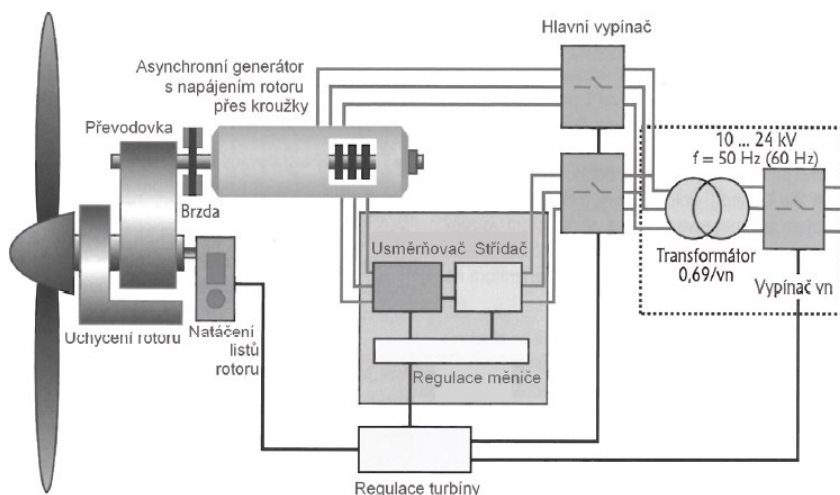


*Obr. 2.6: Zapojení malé větrné elektrárny do distribuční sítě*

### **Větrné elektrárny středních a velkých výkonů**

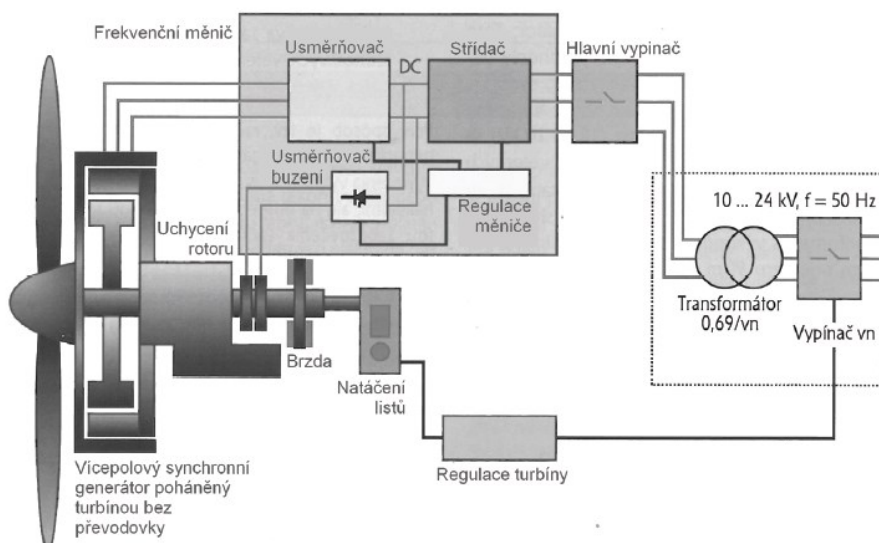
Jak již bylo popsáno v předešlé kapitole, větší větrné elektrárny využívají pro výrobu elektrické energie asynchronní motor s kotvou nakrátko, pracující v generátorovém chodu. Výhodou tohoto typu generátoru spočívá ve velké provozní spolehlivosti, nízké pořizovací náklady a nenáročná údržba.

Velké větrné elektrárny využívají pro regulaci asynchronní generátor s vinutou kotvou, tzv. double-fed induction generátor. Zapojení tohoto typu generátoru je vyznačeno na obrázku 2.7. Jeho výhodou je možnost provozu generátoru při nízkých otáčkách hřídele generátoru. Toto zapojení umožňuje provoz bez napájení rotoru v případě spojení rotorového vinutí nakrátko nebo v případě, že se do rotoru zapojí přídavné odpory, které umožní zvýšení rozsahu skluzu v generátorickém provozu sklonem momentové charakteristiky generátoru. [4]



Obr. 2.7: Zapojení asynchronního generátoru s napájením do rotoru [2]

Pro zvýšení účinnosti se konstruují větrné elektrárny bez převodovky. Pro tento typ konstrukce se využívají více pólové synchronní generátory s budícím vinutím na rotoru (obrázek 2.8). Velkou výhodou je snížení hmotnosti o hmotnost převodovky. Tyto větrné elektrárny mohou pracovat v širokém rozpětí otáček větrného motoru.



Obr. 2.8: Zapojení synchronního generátoru poháněného přímo turbínou [2]

## 2.1.4 Regulace větrných elektráren

Z grafu 2.1 vyplývá, že výkon exponenciálně narůstá s rychlostí větru. Většina větrných elektráren je konstruovaných na rychlost větru, která se pohybuje kolem hodnoty  $15 \text{ m.s}^{-1}$ . Větrné elektrárny se konstruují na průměrnou rychlost v daném místě. Při výskytu větší rychlosti větru musí zapůsobit regulace, aby nedošlo k poškození zařízení, nebo ještě v horším případě, ke zničení větrné elektrárny. Pro velkou část větrných elektráren se rozdělují provozní stavy dle rychlosti větru

do následujících kategorií:  $3 - 5,5 \text{ m.s}^{-1}$  - minimální rychlost větru pro výrobu elektrické energie,  $13 - 15 \text{ m.s}^{-1}$  - jmenovitý výkon elektrárny a  $25 \text{ m.s}^{-1}$  a více - se větrná elektrárna odstavuje. Hlavní důvod regulace je z hlediska překročení jmenovitých otáček, které jsou svázány s frekvencí sítě.

### **Regulace výkonu malých větrných elektráren**

U malých větrných elektráren se většinou setkáme s mechanickou regulací. Velkou výhodou je, že tato regulace je velmi jednoduchá z pohledu konstrukce. Jako nejvíce používanou regulaci patří regulační kormidlo, které při vyšších rychlostech větru natáčí rotor do strany (vodorovno ve směru rychlosti větru). Jako další možná metoda je brzdění pomaluběžnými generátory, který obsahuje usměrňovač a převodovku.

### **Regulace výkonu velkých větrných elektráren**

Na regulaci velkých větrných elektráren se bere větší důraz, než u malých větrných elektráren. To je způsobeno především z finančního hlediska. Pro regulaci se používají metody regulace SHALL, PITCH, ACTIVE STALL, STALL-PITCH A PITCH-STALL.

STALL regulace má lopatky pevně kotveny k rotoru a regulace je dána proměnným tvarem lopatek. Při nárůstu rychlosti větru dochází k elastické změně geometrie konce lopatky. To způsobí zvýšení úhlu náběhu na konci lopatky a postupné odtržení proudu vzduchu od lopatky. Laminární proudění se postupně mění na turbulentní, což má za následek snížení vztlaču a pokles momentu na hřídeli. Velmi nevýhodná je tato regulace při vysokých rychlostech, kdy klesá výkon na rotoru a klesá i jeho účinnost. [2]

PITCH regulace patří mezi aktivní regulace, která pracuje se vstupním signálem výkonu generátoru. Pokud dojde k nárůstu výkonu na rotoru, způsobeného rychlostí dochází k zareagování regulátoru. Ten dává povel hydraulickému systému, který provede natočení lopatek. Tím dochází ke snížení tlaku a většímu radiálnímu odporu lopatek. Moment na hřídeli klesne a elektrárna může pracovat i nadále a nemusí se odstavovat z provozu. Následně pokud dojde ke snížení rychlosti větru, regulace způsobí opačným směrem a dochází k natočení lopatek na opačnou stranu a tím docílíme k navýšení výkonu.

Konstrukce touto typu regulace je náročnější, což má za následek i menší provozní spolehlivost. Velká nevýhoda této regulace spočívá v rychlosti zareagování. Nejvíce se využívá při rozbíhání větrných elektráren a k omezení výkonu na rotoru, při velkých rychlostech větru. [2]

ACTIVE-STALL regulace využívá stejného principu rozběhu větrných elektráren jako u regulace PITCH. Při dosažení limitních hodnot výkonu dojde k natočení lopatek v opačném směru než je tomu právě u regulace PITCH. To způsobí zvýšení úhlu náběhu větru, odtržení proudu vzduchu a pokles vztlaču. Při srovnání této metody s metodou PITCH tak se nesečkáme se zásadními rozdíly, pouze je ve směru natáčení lopatek.[2]

STALL-PITCH regulace vyžaduje vybavení turbíny jak natáčenými listy, tak konstrukcí listů na regulaci STALL. Rozbíhání se provádí za pomoci regulace PITCH a to pouze jen za malých rychlostí větru. Kombinovaným využitím těchto dvou metod dosáhneme využití rychlosti

větru ve velkém rozsahu. Každá metoda má nějaké nevýhody i tato metoda má. Jedny z nich jsou vyšší hlučnost a větší ohyb lopatek. [2]

PITCH-STALL regulace při nízkých otáčkách využívá PITCH regulace jako u STALL-PITCH regulace. Pokud dojde k dosažení vysokých otáček je dále omezován výkon natáčením lopatek a udržován požadovaný výkon. Při ještě vyšších rychlostech větru zapůsobí regulace STALL. Výhodou této regulace je v nižší hlučnosti a menší deformaci lopatek. [2]

## 2.2 Technologie solárních elektráren

Sluneční energie patří do kategorie nejčistších a nejvíce dostupným zdrojem energie na Zemi. Je už od pradávna hlavním zdrojem energie na celé Zemi. Sluneční energie má největší potenciál pro život člověka. Je zdrojem zářivé energie, a to v celém rozsahu spektra od vlnových délek rentgenového a infračerveného záření až po záření rádiové. Největší část slunečního záření je obsaženo v infračervené části o vlnové délce 0,2  $\mu\text{m}$  až 0,3  $\mu\text{m}$ . Slunce se řadí mezi hvězdy středního věku. Její stáří se odhaduje na 4,6 miliard let a předpokládá se, že 5 až 7 miliard let bude zdrojem slunečního záření. Teplota na povrchu Slunce je odhadována na 5800 K. Průměr Slunce je přibližně 1 400 000 km, což je asi 109 průměru Země. Jeho objem je 1,3 milionkrát větší, než objem Země. Hustota Slunce se pohybuje kolem hodnoty 1400  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Výkon je možno vypočítat pomocí následujícího vztahu (2.14):

$$P_s = M_e \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_s^2 \quad (2.14)$$

Poloměr Slunce  $r_s = 6,96 \cdot 10^8 \text{m}$ .

Přenášený výkon ( $P_s$ ), nabývá hodnot  $3,91 \cdot 10^{26} \text{W}$ . Na zemský povrch je přenášena pouze část energie  $\Delta P_s$ .

$$\Delta P_s = \frac{\pi \cdot r_z^2}{4 \cdot \pi \cdot R_{sz}^2} \cdot P_s = \frac{\pi \cdot (6,37 \cdot 10^6)^2}{4 \cdot \pi \cdot (1,49 \cdot 10^{11})^2} \cdot 3,91 \cdot 10^{26} = 1,79 \cdot 10^{17} \text{W} \quad (2.15)$$

Poloměr Země  $r_z = 6,37 \cdot 10^6 \text{m}$

Střední hodnota energie slunečního záření dopadající za jeden den na Zemi je:

$$W_z = \Delta P_s \cdot t = 1,79 \cdot 10^{17} \cdot 86400 = 1,55 \cdot 10^{22} \text{J} \quad (2.16)$$

Střední intenzita záření (sluneční konstanta) dopadající na jednotku plochy Země (nad zemskou atmosférou) je,

$$I = \frac{\Delta P_s}{\pi \cdot r_z^2} = \frac{1,79 \cdot 10^{17}}{\pi \cdot (6,37 \cdot 10^6)^2} = 1367 \text{W}\cdot\text{m}^{-2} \quad (2.17)$$

tato hodnota se nazývá solární konstanta. Část energie se od atmosféry odráží a část se v atmosféře pohlcuje. Na povrchu Země tedy dopadá o něco méně energie v závislosti na zeměpisné šířce, meteorologických podmínkách a denní či roční době. Maximální intenzita záření na povrchu Země je zhruba  $I_{\max} = 1100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  a dopadající energii lze transformovat ve fototermických kolektorech na tepelnou energii nebo ve fotovoltaických kolektorech na elektrickou energii.

### 2.2.1 Využívání sluneční energie

V posledních pár letech využíváme čím dál více sluneční energii. Její hlavní výhodou je dobrá dostupnost, nevyčerpatelnost ale také je to ekologický zdroj. Využívání energie Slunce se dělí na dva základní systémy a to na pasivní a aktivní. [5]

Pasivní systém je v podstatě objekt, který pomocí své uzavřené konstrukce získává tepelnou energii ze slunečních paprsků, mezi které mohou patřit prosklené budovy, skleníky, stěny budov pomocí kterých dochází k prostupu tepla do interiéru. Tohoto se využívá zejména v solární architektuře, kdy se zvyšují podíly zasklení na plochu budovy, kdy místnosti s velmi intenzivním využíváním se soustředí na jih, mezi která patří zejména obývací pokoje.

Aktivní systém se skládá ze sběrače, který pohlcuje zářivou energii a mění ji na tepelnou. Této tepelné energie se využívá zejména k ohřevu teplé užitkové vody, ale je možnost ji využívat k vytápění. Tento systém se nazývá solární kolektor. Další metodou využití sluneční energie je výroba elektrické energie, která se dělí na dva způsoby a to na přímou a nepřímou výrobu.

Přímá výroba využívá fotovoltaického jevu, kdy mění přímo sluneční energii na elektrickou energii. Fotovoltaický jev probíhá v tzv. fotovoltaickém článku a funguje na polovodičovém principu. Zařízení využívající tento princip se nazývají fotovoltaická elektrárna.

Nepřímá výroba obsahuje absorbér, ve kterém se koncentruje energie slunečního záření a ohřívá pracovní médium, které následně pohání parogenerátor a vyrábí elektrickou energii. Princip je tak shodný s klasickou tepelnou elektrárnou. Tady se jako primární zdroj používá sluneční energie místo uhlí. Tyto elektrárny se pak označují jako solární elektrárny.

### 2.2.2 Popis fotovoltaické technologie

Historie fotovoltaiky začala v 19. století, kdy francouzský fyzik Alexander Edmond Becquerel zjistil přírůstek napětí na chemických člancích, které vystavil slunečnímu záření. Jeho fotočlánek byl založen na kovových elektrodách ponořených do elektrolytu. V roce 1877 se tento jev prokázal u selenu. Následně Charles Fritz v roce 1883 sestrojil selenový fotočlánek. Stále však tento jev nedokázal nikdo vysvětlit. Tento jev, nazvaný fotoefekt, dokázal vysvětlit až Albert Einstein, který za něj v roce 1921 dostal Nobelovu cenu. V 50. letech minulého století začal rozvoj polovodičů. Technologii křemíkových článků byl silně ovlivněn metodou výroby čistého monokrystalu, kterou vyvinul Jan Czochralski. První využití fotovoltaického jevu se uplatnilo v kosmonautice, kdy FV panely plnili funkci napájení satelitů. Silným impulsem pro rozvoj FV

panelů byla ropná krize roku 1973, která byla prvním impulzem pro efektivnější výrobu a využívání energetických zdrojů. [6]

Fotovoltaický článek je na principu fotovoltaického jevu, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry) a mohou nastat tyto případy:

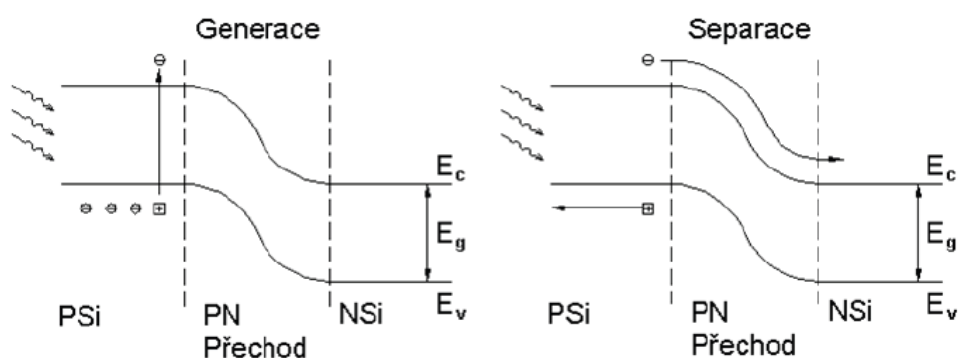
- interakce částice s mřížkou- využití nízkenergetických fotonů,
- interakce s volnými elektrony- dochází pouze ke zvýšení teploty (fototermální systémy),
- interakce s vázanými elektrony- vznikají volné nosiče náboje, nebo může dojít k uvolnění elektronu z vazby.

Pro funkci FV článku je zásadní, aby foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron a vznikl pár elektron-díra. V kovech ovšem dojde k jejich okamžité rekombinaci, které je potřeba zabránit a vzniklý náboj tedy odvézt z článku. Pro tento účel se využívá polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. [2]

Fotovoltaický článek je nejlépe tedy popsat jako velkoplošnou diodu s jedním PN přechodem. Pro vznik fotovoltaické přeměny, musí být splněny tyto podmínky:

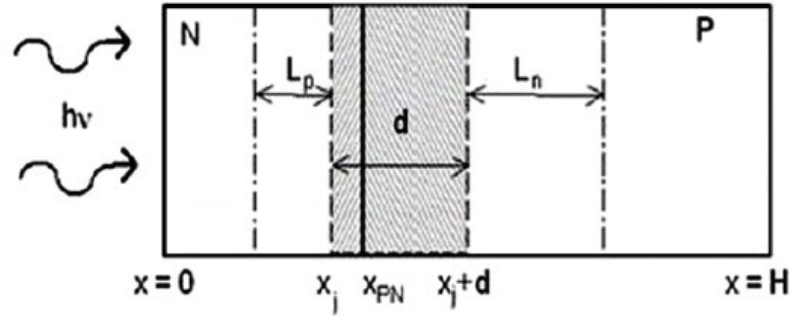
- foton musí být pohlcen,
- foton musí excitovat elektron do vyššího vodivostního pásu,
- vzniklá dvojice elektron (-) – díra (+) musí být separována, aby se znovu nespojila,
- oddělené náboje jsou následně odvedeny ke spotřebiči.

Na obrázcích 3.3 a 3.4 je zobrazen základní princip funkce fotoelektrického jevu.



Obr. 2.9: Princip přímé přeměny energie slunečního záření na elektrickou s využitím fotoelektrického jevu [2]

V ozářené oblasti PN přechodu jsou generovány nosiče, které následně difundují směrem k PN přechodu. Hustota proudu (JPV) je tvořena nosiči, které byly zachyceny oblastí prostorového náboje (rovnice 3.3). Hustota proudu pro jednotlivé oblasti PN přechodu je definována v rovnicích 3.4, 3.5 až 3.6. Nosiče, generované mimo místo přechodu PN musí k oblasti se silným elektrickým polem difundovat. Pokud zrekombinují dříve, než dosáhnou oblasti přechodu PN, neuplatní se při generaci fotovoltaického napětí. [2]



Obr. 2.10: Princip fotovoltaického jevu [2]

$$J_{PV}(\lambda) = J_{PVN}(\lambda) + J_{PVP}(\lambda) + J_{OPN}(\lambda) \quad (2.18)$$

Pro oblast typu N platí rovnice:

$$J_{PVN}(\lambda) = q \cdot \int_0^{x_j} G(\lambda) dx - q \int_0^{x_j} \frac{\Delta n}{\tau_p} dx - J_{sr}(0) \quad (2.19)$$

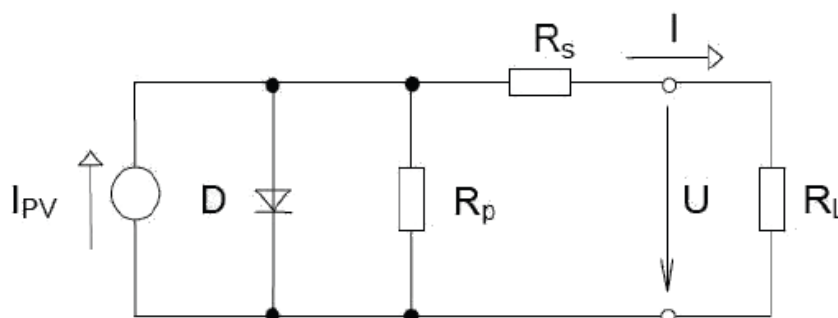
Pro oblast typu P platí:

$$J_{PVP}(\lambda) = q \cdot \int_{x_j+d}^H G(\lambda) dx - q \int_{x_j+d}^H \frac{\Delta n}{\tau_p} dx - J_{sr}(H) \quad (2.20)$$

a pro oblast prostorového náboje přechodu PN platí:

$$J_{OPN}(\lambda) \approx q \cdot \int_{x_j}^{x_j+d} G(\lambda) dx \quad (2.21)$$

Fotovoltaický článek je možno modelovat pomocí náhradního obvodu, znázorněného na obrázku (2.10). Ozářená oblast přechodu PN generuje proud o hustotě JPV, přičemž se oblast typu P nabíjí kladně a oblast typu N záporně. Tím je přechod propustně polarizován a část generovaného proudu teče zpět diodou D. Technologické nedokonalosti (mikrosvody) přechodu PN jsou modelovány svodovým odporem  $R_p$ , vliv odporu materiálu a proudových sběrnic je modelován sériovým odporem  $R_s$ . Výstupní napětí  $U$  na FV článku je o úbytek napětí na sériovém odporu nižší, než napětí  $U_j$  na diodě. [2]



Obr. 2.11: Náhradní schéma fotovoltaiického článku[7]

Pro provádění různých testů, aniž by se poškodil lze fotovoltaiický článek namodelovat pomocí matematického modelu. Matematický model fotovoltaiického článku lze odvodit z polovodičových fotodiod. Vychází se z voltampérové charakteristiky, která se také nazývá Schockleyho rovnice:

$$I = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{U}{U_t}\right) - 1 \right] - I_L \quad (2.22)$$

### 2.2.3 Konstrukce fotovoltaiického článku

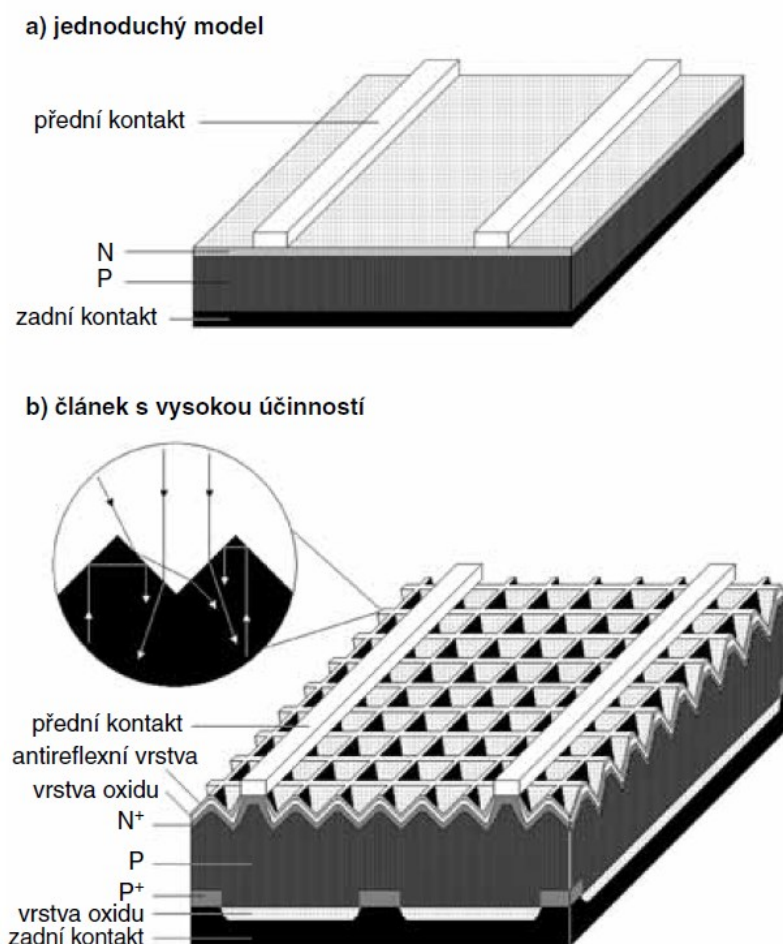
Fotovoltaiické panely se vyráběly na různé bázi, v současné době jsou nejvíce rozšířeny monokrystalické, polykrystalické a amorfni. Z hlavní části se skládá z křemíku, ten se vyskytuje ve formě křemene, neboli oxidu křemičitého. Důležitým parterem křemíku je šířka zakázaného pásma  $\Delta E_G \approx 1,1$  eV. Fotovoltaiické panely mohou být založeny i na jiných bázích, které je možné rozdělit na levnější a na dražší. Levnější variantu představují organické polymery, které mají nižší účinnost. Nerozhodneme-li se pro levnější variantu, zbývá využít pouze panely na bázi GaAs, ty jsou typické pro využití ve vesmíru, a to z důvodu technické náročnosti.

Fotovoltaiické články se skládají z velkoplošné polovodičové diody s přechodem PN, která je orientovaná kolmo k čelní ploše. Pro vytvoření PN přechodu se materiál upravuje v difúzních pecích. Na přední straně bývá antireflexní úprava povrchu, a to kvůli minimalizaci odrazu, a aby se zvýšila jeho účinnost a využilo se tak maximální dopadající záření. Články s nejvyšší účinností se vyznačují ve většině případů až černým povrchem. Je však možné docílit toho, aby články v odraženém světle vykazovaný určitý barevný odstín. Této úpravy se dosáhne nanesením tenké průhledné vrstvy pro zesílení odraženého záření určité vlnové délky v důsledku interference vln elektromagnetického záření na této dané vrstvě.

Přední kontakt má obvykle tvar mřížky, popř. hřebínku. A to z toho důvodu, aby zakryl co nejmenší část plochy a zároveň aby světlo dopadalo na co největší možnou plochu článku. Zadní kontakt je celoplošný u standardních panelů. Nanášení kontaktů na standardní články se provádí sítotiskem, popř. náročnějšími vakuovými technologiemi.



Příklad křemíkového článku je na obr. 2.12. Na obrázku 2.12a) je znázorněn jednoduchý model, na němž je vidět přední a zadní kontakt a PN přechod. Účinnost tohoto článku je velice malá, a to v důsledku rekombinačních ztrát. Pro zvýšení účinnosti je možné použít článek zobrazený na obrázku 2.12b) Tento článek je konstrukčně dokonalejší. Na přední straně se skládá z antireflexní vrstvy, která minimalizuje odraz a maximalizuje vnik fotonů do fotovoltaického článku. Vyleptaná struktura malých jehlanů na přední straně má za příčinu, že fotony lépe vstupují do fotovoltaického článku. Pokud však projdou, aniž by vyvolaly fotovoltaickou přeměnu, a odrazí se od zadní elektrody, na přední straně nemohou vystoupit ven z článku a následně jsou totální odrazem vráceny zpět.

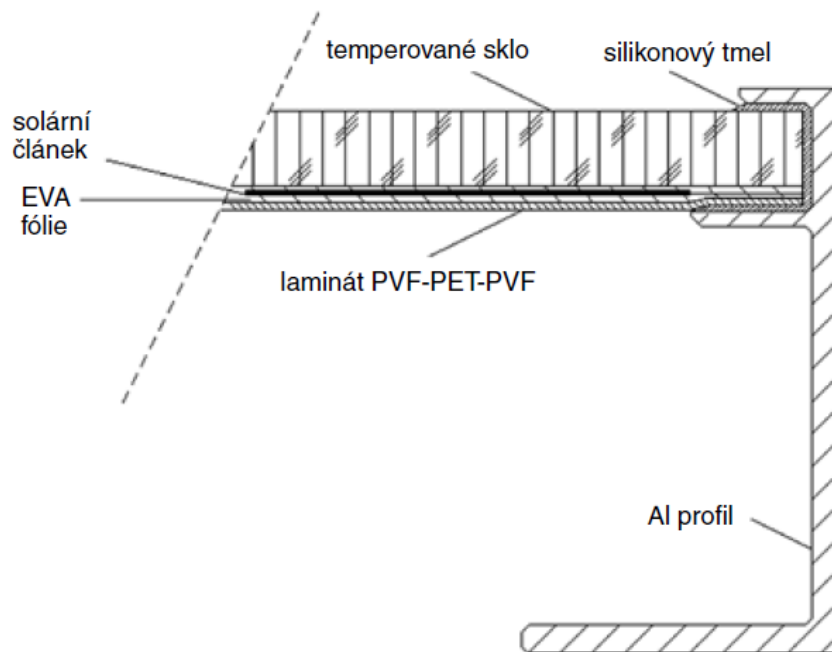


Obr. 2.12: Schéma křemíkového PV článku[9]

## 2.2.4 Fotovoltaické panely

Fotovoltaické panely se skládají z jednotlivých článků, které jsou v serio-paralelní kombinaci. Z toho důvodu, aby při definovaném osvětlení dokázaly poskytnout potřebné stejnosměrné napětí a výkon. Příkladem je konstrukce zobrazená na obr. 2.13. Z tohoto obrázku je zřetelné, že na přední straně fotovoltaického panelu je temperované sklo, které se vyznačuje velkou odolností proti nárazu a zároveň dokáže odolávat jiným povětrnostním vlivům. Na sklo je položena plastová fólie EVA, a na níž jsou naskládány propojené fotovoltaické články. Následně se přes tyto

propojené články pokládá znovu tato fólie EVA a zadní strana je tvořena laminátovou kompozicí PVF-PET-PVF. Je nutné vyčerpát vzduch mezi těmito vrstvami a zahřát panel nad teplotu tání fólie EVA. Dojde k roztečení etylvinylacetátu a tedy k zalití touto hmotou fotovoltaických článků v prostoru mezi předním sklem a zadní laminátovou stěnou panelu. Posledním krokem je rámování a zatmelování panelů silikonovým tmelem do hliníkových profilů a je k nim doplněna krabice s výstupními kontakty. Tímto dochází k naprostému utěsnění fotovoltaických panelů proti vodě, popř. jiným nečistotám. A takto zkonstruované panely dosahují životnosti obvykle 20 až 30 let.



Obr. 2.13: Schéma konstrukce PV panelu [9]

### 2.2.5 Zapojení fotovoltaických elektráren

Fotovoltaické panely je možno zapojit do několika metod. Většinou se rozdělují do tří základních typů: autonomního systému, hybridního systému s akumulací a systémy přímo spojené se sítí bez akumulace.

Autonomní systémy se využívá v odlehlých místech, kde není možnost připojení k elektrické síti. Většinou se uplatňují například jako zdroje elektrické energie pro chaty, napájení dopravní signalizace a ostatní. Tento systém se nazývá *Grid-off*, který se skládá z fotovoltaického modulu, akumulátoru, ochranného modulu a řídicího systému. Většinou síť *Grid-off* pracuje jako běžné síťové spotřebiče 230 V/50 Hz, je možné se také systémem pracujícím se stejnosměrným napětím většinou 12 nebo 24 V.

Systém přímo spolupracující sítě bez akumulace nebo též označován jako *Grid-on*. Veškerá vyrobená elektrická energie se předá do distribuční sítě. S tímto systémem se setkáváme u středních a velkých fotovoltaických elektráren.

Hybridní systém je kombinace klasické síťové elektrárna *Grid-on* a ostrovního provozu *Grid-off*. S těmito systémy se většinou setkáváme u malých fotovoltaických systémů. Výhodou tohoto systému je maximální využití elektrické energie v místě výroby.

### 2.2.6 Měniče

Měniče nebo též invertory jsou zařízení měnící stejnosměrný proud na střídavý proud. Fotovoltaické panely vyrábí pouze stejnosměrný proud, který je nutno změnit na střídavý proud, pokud jej chceme dodávat do elektrické rozvodné sítě. Většina nových měničů umí poskytovat informace o vlastní výrobě elektrické energie. V poslední době se většina zákazníků rozhoduje z hlediska nejvyššího výkonu a minimem ztrát. Toho se docílí polovodičovými prvky, které nahrazují transformátor s tepelnými ztrátami.

Měniče lze rozdělit do dvou skupin a to na ostrovní a síťové. Ostrovní měnič generuje svoji vlastní frekvenci a napětí. Většina těchto měničů pracuje na frekvenci 50 Hz a napětí 230 V. Je možné využívat běžných spotřebičů na střídavý proud. Naopak síťové měniče mají synchronizovaný kmitočet a napětí se spolupracující sítí.

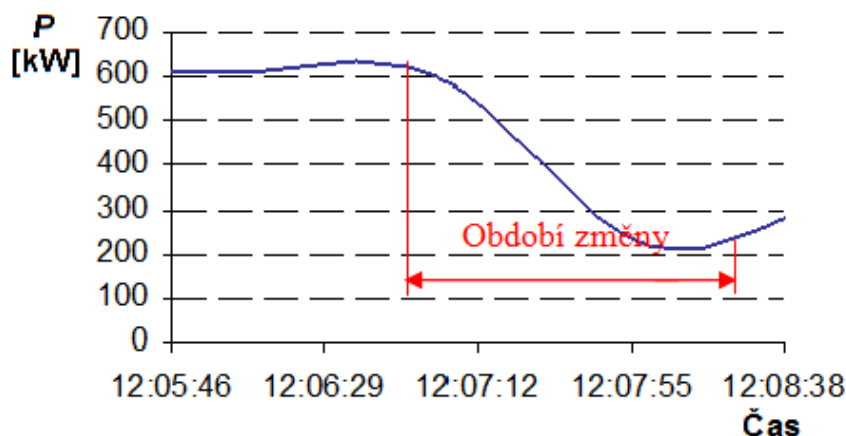
### 3. Rozbor stochastického provozu větrných a solárních zdrojů, zapojených do distribučních sítí

#### 3.1 Klasifikace stochastiky

Obečně stochastika se zabývá zkoumáním a modelováním náhodných jevů. Je to souhrnný název pro teorii pravděpodobnosti a matematickou statistiku. Při hodnocení jednotlivých energetických zdrojů, které mají vliv na stochastické změny je možné je rozdělit na jednotlivé kategorie. Následující rozdělení je provedeno do tří kategorií, které bylo vytvořeny na základě měření na větrných a fotovoltaických elektrárnách. [11]

##### Krátkodobá charakteristika

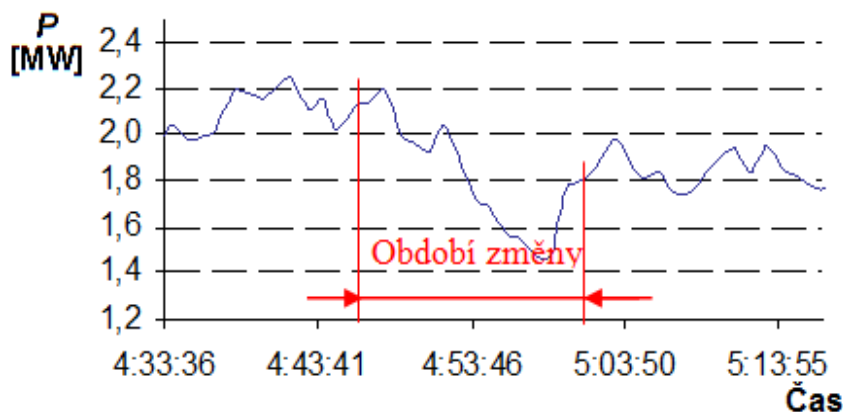
S touto charakteristikou se většinou setkáváme u fotovoltaických elektráren, a proto ji většinou nazýváme jako fotovoltaická. Hlavní vliv na tuto charakteristiku má sluneční záření, které se pohybuje v řádech sekund. Příklad této charakteristiky je na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Krátkodobá charakteristika

##### Pozvolná charakteristika

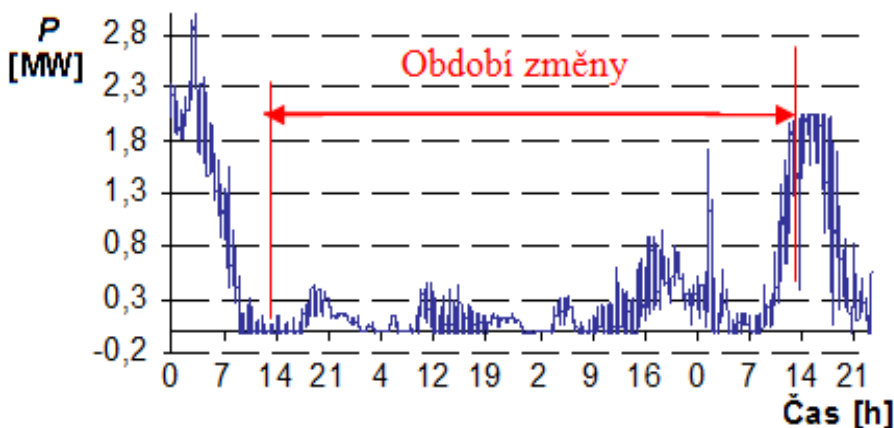
Tento průběh představuje převážně větrnou elektrárnu, u které se mění velikost výkonu méně než u krátkodobé charakteristiky. Její změny výkonu se pohybují v řádech minut (obrázek 3.2). S touto charakteristikou se můžeme setkat i u fotovoltaických elektráren a to v ranních a večerních hodinách, kdy tomto časovém horizontu převládá difuzní světlo nad přímým světlem a výkon se mění velmi málo s časem.



Obr. 3.2: Pozvolná charakteristika

### **Dlouhodobá charakteristika**

Předchozí zmíněné charakteristiky jdou velice těžko předpovídat ve srovnání s dlouhodobou charakteristikou. U které se jednotlivé změny pohybují řádově v jednotkách hodin. S touto charakteristikou se setkáváme zejména u FVE v noci, dlouhodobých předpovědích počasí a při proměnných ročních obdobích. Názorný příklad dlouhodobé charakteristiky je na obrázku 3.3, kde jsou zobrazeny data z větrné elektrárny.



Obr. 3.3: Dlouhodobá charakteristika

## **3.2 Koeficient využití**

Patří mezi základní ukazatele efektivity energetických zdrojů. Tento koeficient se využívá při hodnocení provozu elektráren v závislosti na meteorologických podmínkách za určité časové období. Jeho hodnota bude rovná jedné za předpokladu celoročního provozu na jeho instalovaný výkon. Čím bude jeho hodnota nižší, tím lze konstatovat, že se jedná o méně stabilní zdroj energie. Koeficient využití je hodnotící parametr, který udává, do jaké míry je zdroj energie využíván vzhledem k jeho instalovanému výkonu ve sledovaném období. Sledované období je obvykle jeden rok a definuje se tedy roční koeficient využití instalovaného výkonu  $K_r$ .

Z matematického hlediska se jedná o poměr skutečně vyrobené energie za rok  $W_r$  k součinu instalovaného výkonu  $P_i$  a  $h$  je počet hodin. Při výpočtu ročního koeficientu  $K_r$  odpovídá 8760:

$$K_r = \frac{W_r}{P_i \cdot h}; \quad (3.1)$$

Kde:

- $k_r$  - koeficient ročního využití instalovaného výkonu (-),
- $W_r$  - množství vyrobené energie za rok (kWh),
- $P_i$  - instalovaný výkon (kW),
- $h$  - počet hodin (h).

Z tabulky 3.1 je vidět, že roční koeficienty využití FVE a VTE mají velice nízkou hodnotu. Velmi nízké koeficienty mají značný podíl na dodávky výkonu a následně nepříznivě působí na stabilitu elektrické sítě. Značný podíl na tom mají metrologické podmínky. Roční koeficient věrných elektráren je větší než u solárních elektráren.

Typ elektrárny	2006	2007	2008	2009	2010
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Větrné	8,27	12,52	18,65	17,03	17,54
Solární	-	5,71	2,75	2,18	3,59

Tab. 3.1: Koeficienty ročního využití VE a FVE v letech 2006 – 2010 [12]

### 3.3 Extrémní případy FVE a VE

Největším nepřítelem elektrizační soustavy jsou výpadky některých zdrojů nebo též velké množství vyráběné energie. Tyto problémy lze rozdělit do dvou extrémů:

- a) S prvním extrémem se setkáváme, pokud FVE za vhodných slunečného dne dodává výkony blízké svému maximu a odběry jsou v danou dobu velmi nízké. Tento problém může též nastat u VE. Při tomto problému je nejvhodnější alternativou daný zdroj od sítě odpojit.
- b) Dalším extrémem je nedostatek slunečního svitu pro FVE nebo naopak bezvětří pro VE. Odběr elektrické energie je v té době velký. Veškerá energie musí být hrazena z rozvodné soustavy.

Tyto dva zmíněné extrémy mají velký vliv na stochastiku vyráběného výkonu a je nutné je brát v úvahu.

## 4. Zálohování větrných a solárních elektráren s možností akumulace energie

V posledních letech nastal velký rozvoj obnovitelných zdrojů, které jsou osvobozeny od povinnosti regulace výkonu. Nepodílí se na vyrovnání denního diagramu výroby a spotřeby. Otázkou regulace výkonu, která řeší udržení rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektřiny v každém okamžiku bude tudíž pro budoucnost elektrizační soustavy zcela zásadní. Z těchto důvodů je nezbytné uvažovat o instalaci vhodných akumulátorů elektřiny v problémových místech.

Pro účely matematického modelování takto provozované elektrizační soustavy je nezbytné posoudit vhodné akumulační technologie z hlediska jejich možného působíště (na úrovni přenosové soustavy, distribuční soustavy), uplatnění (náhrada primární, sekundární či terciální regulace) a zvážit jejich možnosti nasazení v České republice.

### 4.1 Možnosti akumulace

Podle principu uchování rozlišujeme zásobníky energie založené na fyzikálním či chemickém principu. Chemický princip uchování energie zahrnuje technologie, u nichž při skladování energie dochází k vratným reakcím elektrodového materiálu s ionty elektrolytu. Mezi tyto technologie řadíme (Pb) a alkalické (Ni-Mh) akumulátory, moderní akumulátory lithium-ion (li-Ion) a sodík-síra (NaS). Do této skupiny řadíme i superkapacity, které jsou postaveny především na fyzikálním principu, avšak mají podobnou konstrukci jako chemické.

Fyzikální technologie uchování energie využívají k akumulaci změn potenciálové nebo kinetické energie. Sem zařazujeme přečerpávací vodní elektrárny (PVE), akumulaci do stlačeného vzduchu (CAES), setrvačníky, supravodivé akumulátory (SMES).

Technické údaje výše jmenovaných systémů akumulace jsou přehledně shrnuty v následující tabulce. Jsou zde uvedeny dočasné současné hodnoty typických instalovaných výkonů, dynamika jednotlivých systémů, prostorové nároky, životnost a současné investiční náklady.

Technologie	Výkon [MW]	Doba vybití	Účinnost [%]	Samovybitení [%/měsíc]	Životnost [cyklů]	Specifická energie [Wh/kg]	Hustota energie [Wh/l]	Investiční náklady [\$/kW]
Pb	< 20	10s - 5h	70 - 80	3 - 30	500 - 800	30 - 40	60 - 75	2 000
NiMH	< 5	1m - 1h	65	2 - 25	500 - 1 000	30 - 100	140 - 300	
Li-Ion	< 5	15m - 5h	80 - 90	2	1 200	100 - 250	250 - 620	5 000
NaS	1 - 200	8h	80 - 85	velmi nízké	2 000 - 4 500	150	370	3 500
VRB	0.05 - 4	4 - 8h	75 - 80	2 - 3	15 000	10 - 25	15 - 25	7 000
Zn-Br	0.1 - 2	2 - 4h	75 - 80	2 - 3	2 000 - 3 500	75 - 85	60 - 90	5 000
Superkapacity	< 5	30s - 1h	> 90	50	> 500 000	5 - 85	-	2 000
PVE	> 50	5 - 10h	75		30 let	0.1 - 2	0.1 - 2	2 700
CAES	10 - 400	2 - 24h	42 - 53		35 let	-	2	600 - 750
Setrvačníky	0.1 - 2	15s - 15m	90	80	20 000	10 - 30	-	4 000
SMES	1 - 20	1s - 2h	95		> 30 000	dle proud.	dle proud.	400 - 2 000

Tab. 4.1: Technologie akumulace elektrické energie [13]

## 4.2 Možnosti akumulace v ČR

Velká většina důvodů pro zavádění akumulace souvisí s dodávkou (z části i spotřebou) elektřiny, která se odvíjí od denní periodicity přírodních jevů. Akumulace tedy musí mít zejména denní charakter.

Zapojení potřebného regulačního výkonu v akumulaci do české elektrizační soustavy je možné buď na systémové, regionální či lokální úrovni. Pro systémovou centrální akumulaci na úrovni PS jsou vhodné technologie PVE CAES.

Regionální akumulace probíhá na úrovni předacích míst PS/110kV. V ES ČR je přibližně 30 těchto míst vhodných pro umístění akumulace o velikosti 30-50 MW (potenciálně tedy můžou dodat 1 000 MW regulačního výkonu bez velkých dodatečných investic do síťové infrastruktury). Vhodné technologie regionální akumulace jsou NaS, Redox, superkapacitory, setrvačníky, SMES.

Lokální akumulace se může odehrávat v místě připojení OZE do sítě NN. Její velikost lze uvažovat cca 50% instalovaného výkonu ve VTE a FVE. Vhodné technologie jsou NaS, alkalické akumulátory, Redox, Pb akumulátory, elektromobily. Podrobněji je použitelnost jednotlivých technologií v ES ČR probrána níže.

PVE CAES mají potenciál akumulace velkého objemu energie. Jsou tudíž vhodné pro celosystémovou akumulaci. V České republice je technický potenciál na 13 PVE o celkovém instalovaném výkonu až 10 000 MW. Reálně však lze z ekonomických, či ekologických důvodů, uvažovat o zprovoznění jedné PVE o přibližném výkonu 1 000 MW nejdříve však v roce 2025. Pro zjištění možnosti využití technologie CAES v ČR je nutné provést geologický průzkum lokalit s vhodnými hlubinnými prostory. Nevýhodou CAES je nižší účinnost ve srovnání s PVE.

NaS akumulátory jsou vhodné pro akumulaci elektřiny s regionálním dopadem. Rovněž jsou v podmínkách ČR využitelné u VTE a FVE parků pro poskytnutí dodávky elektřiny v době, kdy jsou tyto OZE mimo provoz.

Redox baterie jsou vzhledem k velikosti dodávaných jednotek spíše lokálního charakteru a vhodné jako rychlá záloha, nebo pro provozování diagramu menších nepredikovaných OZE. Jejich velkou nevýhodou je vyšší cena oproti NaS bateriím. Z těchto důvodů lze považovat jejich masivní nasazení v podmínkách ČR za méně pravděpodobné.

Superkapacitory a setrvačníky mohou v řádu milisekund dosahovat vysokých výkonů, ale pouze po velmi krátkou dobu (sekundy až minuty). Jsou tudíž vhodné pro okamžité vyrovnávání změn. V podmínkách ČR mají potenciál v celosystémové regulaci jako náhrada primární regulace, pokud ji nebude možné zajistit na točivých strojích.

SMES jsou poměrně široce použitelné, jelikož poskytují prakticky okamžitou odezvu a současné nejmodernější a největší magnety jsou schopny rychle pojmout velké množství energie



(výkon až 10 MW s kapacitou 10 MJ). Jejich nasazení v ČR však potřebuje důkladné zvážení umístění.

Pb akumulátory jsou v současnosti nejrozšířenější a dlouhou dobu budou ještě nenahraditelné pro lokální akumulaci. Nicméně z dlouhodobého hlediska se jedná o neperspektivní technologii a její masivní rozšíření v ČR pro účely regionální nebo celosystémové regulace je nepravděpodobné.

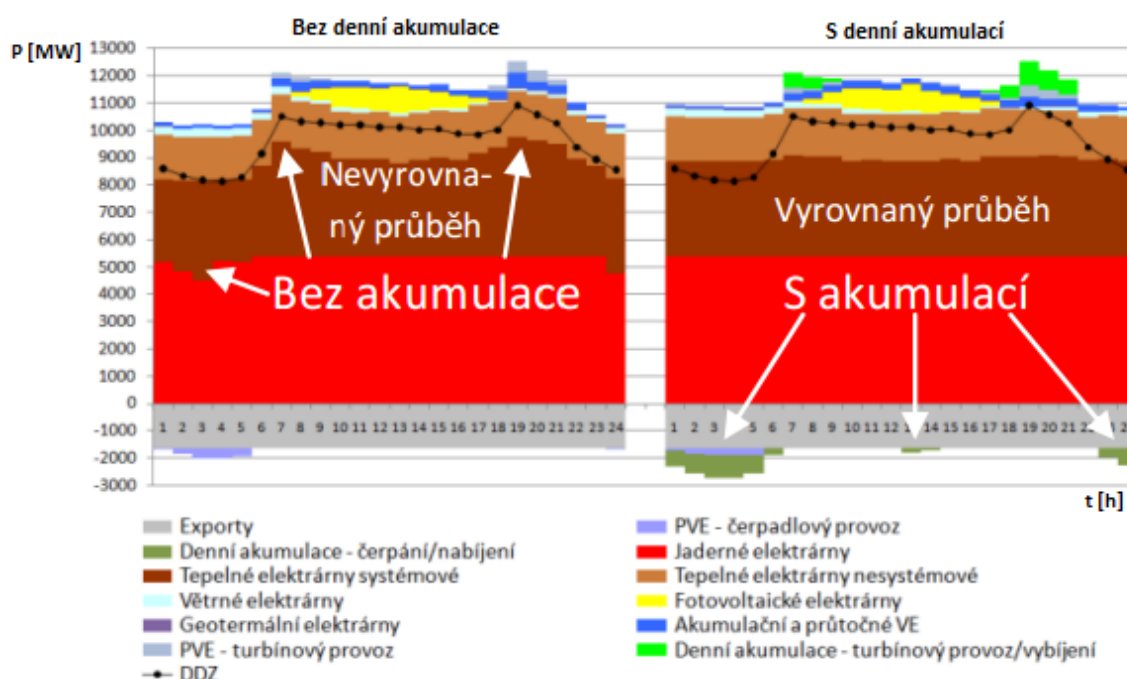
NiMH, NiZn, Li-Pol, Li-Ion jsou využitelné jako akumulátory energie v elektromobilech. Jejich prostřednictvím jsou pak významné pro místní (nn) či regionální (vn) regulaci. Elektromobily by dle odhadů mohly v roce 2030 dosáhnout v ČR až 750 000 kusů. To při jejich zapojení představuje teoretický regulační výkon v rozmezí 1 500 až 6 000 MW a leží v nich velký potenciál v možném využití.

Vodík (akumulace pomocí elektrolýzy) je momentálně vzhledem k nízké účinnosti celého akumulčního cyklu jako síťový akumulátor energie nevhodný.

### 4.3 Princip denní akumulace

Názorná ukázka denní akumulace je zobrazena na obrázku 4.1, kde v levé části obrázku je systém bez akumulace a v pravé části s akumulací. Značnou výkonovou nerovnováhu mezi výrobou a spotřebou způsobují fotovoltaické elektrárny, jak je vidět z obrázku. Působí na systémové tepelné elektrárny a jaderné elektrárny. V pravé části obrázku je zobrazena denní akumulace o výkonu 1000 MW. Denní průběh systémových tepelných elektráren a jaderných elektráren je podstatně vyrovnaný. To přispívá možnostem snížení výkonových rezerv. Zároveň zvyšujeme účinnost tepelných a jaderných elektráren, které jsou silně závislé na změně výkonu.

Nejpříjemnější varianta akumulčního systému je přečerpávací elektrárna o výkonu 1000 MW. V oblastech distribučních soustav přichází jako nejlepší řešení NaS akumulátory.



Obr. 4.1: Denní akumulace v simulačním systému [13]

## 5. Možnosti potlačení negativních vlivů v distribučních sítích

Velkou nevýhodou FVE a VTE je jejich závislost na meteorologických podmínkách, neboť se to přímo projevuje na jejich okamžitém vyráběném výkonu. Tato závislost se projevuje nejen na distribuční síť, ale i na celou rozvodnou síť.

Vysoká výroba z FVE a VTE způsobuje odstavování bloků klasických zdrojů do studeného stavu. To má nepříznivý dopad na jejich vyšší opotřebení a životnost. Stávající zdroje nebyly pro tyto stavy zpravidla navrženy. V naší soustavě je omezené množství takových bloků, které jsou schopné takového provozu. Ve většině se jedná o elektrárny na spalování plynu.

Vyšší nároky na regulaci mají nepříznivý ekonomický dopad při výstavbě nových či přestavbě stávajících elektráren. Výkonová nerovnováha mezi odběry a výrobou elektrické energie FVE a VTE má dopad na systémové tepelné elektrárny, které musí tyto výkonové změny dorovnávat. Dochází tedy k vyšším nárokům na výkonové rezervy, a tím i podpůrné služby. Udržovat vysoké výkonové rezervy ve výrobních blocích je silně neekonomické.

### 5.1 Vzájemná spolupráce solární a větrné elektrárny

Při vzájemné spolupráci větrné a fotovoltaické elektrárny jsme schopni vyrovnat výkonovou bilanci. Každý z těchto zdrojů má nějaké klady a zápory. Větrná elektrárna nezávisí na denních cyklech (den-noc), ale pouze na rychlosti větru.

V ČR je nedostatek vhodných lokalit pro kombinovanou výstavbu těchto zdrojů. Lokalita pro kombinovanou výrobu z větrných a solárních elektráren musí mít vysokou intenzitu záření a též vysokou rychlost větru. Pro aplikaci tohoto kombinovaného systému vyhovuje nejvíce v ČR oblast Vysočina, kde je průměrná rychlost větru  $5,5 \text{ m.s}^{-1}$  ve výšce 100 m a průměrné sluneční záření  $1054 \text{ kWh.m}^{-2}$ . Další vhodnou lokalitou je jižní část Jihomoravského kraje, kde je průměrné roční sluneční záření vysoké. Ale za to průměrná rychlost je nižší než na Vysočině. [14]

Velkou výhodou kombinované dodávky je možnost dodávky elektrické energie během noci, kdy solární elektrárna je mimo provoz. Pro lepší funkci systém, se doporučuje doplnit o akumulaci energie, která by vyrovnala výkyvy ve spotřebě a dodávce energie.

### 5.2 Vliv OZ na záloze pro regulaci frekvence předávaného výkonu

*Primární regulace* – jedná se o automatickou autonomní regulaci výkonu působící v několika vteřinách. Jedná se o regulaci, která kompenzuje vlivy výpadků zdrojů nebo jejich náhlé změny výkonu. VTE a FVE jsou touto dodávkou výkonu typické, avšak samy nejsou schopny přispívat k regulační rezervě tohoto typu. Dle PPDS výrobní s obnovitelnými zdroji mohou být zproštěny povinnosti primární regulace.

*Sekundární regulace* – jedná se o regulaci, která využívá rezervu točivých strojů. Řídí se pomocí centrálního regulátoru frekvence a předávaných výkonů. Úkolem této regulace je zredukovat deficit výkonu v řízené oblasti.

*Terciární regulace* – jedná se o studené rezervy, které dobře snáší rychlou změnu zatížení. Z důvodu závislosti na meteorologických podmínkách, není možné využít VTE ani FVE k sekundární či terciární regulaci.

#### Velikost výkonu podpůrných služeb

Stanovení velikosti výkonu podpůrných služeb pro zabezpečení chodu soustavy vlivem výroby z obnovitelných zdrojů je dán následujícím vztahem:

$$P_{\text{Pps}} = \text{round} (k_{\text{PpsVTE}} \cdot P_{\text{instVTE}}), \quad (5.1)$$

kde:

$P_{\text{Pps}}$  - navýšení podpůrných služeb,

$k_{\text{PpsVTE}}$  - součinitel navýšení výkonu pro systémovou rezervu (0,22 k roku 2006),

$P_{\text{instVTE}}$  - instalovaný výkon ve VTE.

### **5.3 Změny napětí**

Největší problém, se kterým se nejčastěji setkáváme u obnovitelných zdrojů je změna napětí. Pro správnou funkci elektrických zařízení je nutno dodržet nařízenou hodnotu napětí a její kvalitu. Legislativy zabývající se touto problematikou je následující. Prvním z nich je energetický zákon 458/2000 Sb., který nařizuje distributorovi zajišťování kvality dodávky dle prováděcího předpisu. Vyhláška 540/2005 Sb. Obsahuje prováděcí předpis a §8, který obsahuje odchylky napájecího napětí a frekvence. Jako dalším legislativním nařízením jsou Pravidla provozování distribučních soustav (PPDS). Kvalitou dodávané elektrické energie z veřejné distribuční sítě se zabývá norma ČSN EN 50 160.

Velký vliv na změny napětí mají solární a větrné elektrárny (obnovitelné zdroje), které jsou silně ovlivňovány počasím. Z tohoto důvodu se hledají nová řešení, které by tento problém mohly vyřešit. Často nová řešení, jsou finančně velmi nákladné a je nutno od nich ustoupit. Hledají se jiná, levnější řešení. Z pohledu změny napětí v distribučních sítích přicházejí v úvahu následující řešení:

- sezonní regulace napětí,
- dynamická regulace napětí,
- regulační transformátory VN/NN

Sezonní regulace napětí spočívá v nastavování distribučních transformátorů podle ročního období. Příklad provedení této regulace může být proveden kupříkladu na fotovoltaické elektrárně.

Tento zdroj je silně ovlivňován intenzitou slunečního záření, o které víme, že v letním období je vyšší, než v zimním. Z těchto informací jsme schopni nastavovat převody na distribučních transformátorech. V letním období nastavíme transformátor na větší převod (například: ÚSEK.= 22,8 kV) a v zimním období na nižší převod (například: ÚSEK.=23,2 kV).

Dynamická regulace napětí využívá dynamického řízení distribučních transformátorů, kdy za pomoci měřicího členu, který je umístěn na konci vedení, dává informaci transformátoru. A ten následně provádí jeho přenastavení na optimální hodnotu.

Regulační transformátory VN/NN řeší regulaci napětí na požadovanou hodnotu pomocí většího počtu automatických regulačních transformátorů. Tyto regulační transformátory VN/NN jsou většinou instalovány v problematických oblastech.

Při srovnání těchto tří regulačních metod se došlo k závěru, že metoda sezónní regulace je nejlevnější, ale zato méně efektivní. Naopak, metody dynamické regulace a automatické regulační transformátory jsou dražší. Ale z hlediska kvality napětí jsou lepší, než sezónní regulace.

## 5.4 Podpůrné a systémové služby

Držitelem autorizace pro rozvod elektrické energie na úrovni přenosové soustavy (PS) je v ČR akciová společnost ČEPS, a.s. Pro provoz této sítě je žádoucí zajistit minimální technické, konstrukční a provozní požadavky pro jednotlivé subjekty. Těmito subjekty jsou:

- vlastníci elektráren,
- odběratelé elektrické energie (provozovatelé DS, odběratele z PS),
- obchodníci s elektrickou energií,
- sousední přenosové soustavy.

Každý uživatel musí plnit technicko-ekonomické podmínky k tomu, aby:

- se účastnil na udržování soustavy v dobrých provozních podmínkách,
- byl schopen zamezit nebo eliminovat vznik poruch vně svého zařízení.

Souhrnnými dokumenty, které stanovují podmínky provozování přenosových a distribučních soustav, jsou tzv. Síťový kodex a Energetický zákon. Tyto dokumenty respektují vzájemnou mezinárodní spolupráci v synchronně propojených soustavách ENTSO-E. Cílem je zajistit spolehlivý a bezpečný provoz elektrizační soustavy při zachování provozních parametrů v požadované kvalitě.

### 5.4.1 Činnost provozovatele přenosové soustavy

Hlavní činností provozovatele přenosové soustavy je zajišťovat spolehlivý provoz a rozvoj přenosové soustavy v ČR, ale i v kontextu mezinárodní spolupráce i v rámci propojených přenosových soustav. Provozovatel zajišťuje přenos elektřiny mezi výrobcí a distributory,

systémové a podpůrné služby, rovnováhu výroby a spotřeby, spolupracuje na přidělování přeshraniční kapacity formou aukcí.

Činnosti společnosti ČEPS jsou následující:

- systémové služby,
- podpůrné služby,
- přenosové služby,
- dispečerské řízení,
- zahraniční spolupráce,
- technická infrastruktura.

#### **5.4.2 Systémové služby**

Systémové služby zajišťují kvalitní a spolehlivou dodávky elektřiny na úrovni přenosové soustavy (PS) a plnění mezinárodních závazků a podmínek propojení elektrizační soustavy (ES) ČR. Kvalitou se rozumí zejména parametry frekvence a napětí, definované Kodexem PS. Spolehlivostí dodávky se rozumí nepřerušenosť dodávky v odběrných místech z PS definovaná průměrným počtem a trváním dílčích výpadků dodávky v jednotlivých předacích místech.

Systémové služby jsou placeny jako součást ceny za elektřinu všemi spotřebiteli těchto služeb, tedy zákazníky, výrobci připojenými k ES a při připojení k ES i spotřebiteli v ostrovech. Peníze za systémové služby jsou pak prostřednictvím provozovatelů regionálních distribučních soustav a výrobců placeny ČEPS.

Systémové služby jsou následující:

Udržování kvality elektřiny:

- udržování souhrnné výkonové zálohy pro primární regulaci frekvence;
- sekundární regulace  $f$  a  $P$ ;
- sekundární regulace napětí;
- terciární regulace napětí;
- zajištění kvality napětíové sinusovky;
- zajištění stability přenosu.

Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase:

- sekundární regulace  $f$  a  $P$ ;
- terciární regulace výkonu;
- využití dispečerské zálohy.

Obnovení provozu:

- využití plánu obnovy spolu s PpS ostrovní provoz a start ze tmy

Dispečerské řízení:

- zajišťování bezpečnosti provozu prostřednictvím plánu obrany a provozních instrukcí,
- řízení propustnosti sítě (toků činných výkonů) pomocí zapojení sítě, redispečinku, protiobchodu.

### 5.4.3 Podpůrné služby

Podpůrné služby jsou prostředky pro zajištění systémových služeb. Jsou to činnosti fyzických nebo právnických osob pro zajištění provozování elektrizační soustavy a pro zajištění kvality a spolehlivosti dodávky elektřiny. Pomocí podpůrných služeb je možno korigovat rozdíly mezi odběrem a výrobou, a to změnami spotřeby či výkonů výroby. Subjekty připojené do elektrizační soustavy mají právo, nikoliv povinnost, při splnění technických a obchodních podmínek stanovených provozovatelem přenosové soustavy nabízet podpůrné služby.

#### Mezi podpůrné služby jsou:

Kategorie podpůrných služeb nakupované na volném trhu prostřednictvím denního trhu s podpůrnými službami anebo nakupované prostřednictvím výběrových řízení:

- primární regulace frekvence bloku (PR)
- sekundární regulace výkonu bloku (SR)
- terciární regulace výkonu bloku (TR)
- rychle startující 10minutová záloha (QS10)
- rychle startující 15minutová záloha (QS15)
- dispečerská záloha (DZt)
- snížení výkonu (SV30)

Kategorie PpS nakupované prostřednictvím přímé smlouvy s poskytovatelem podpůrné služby:

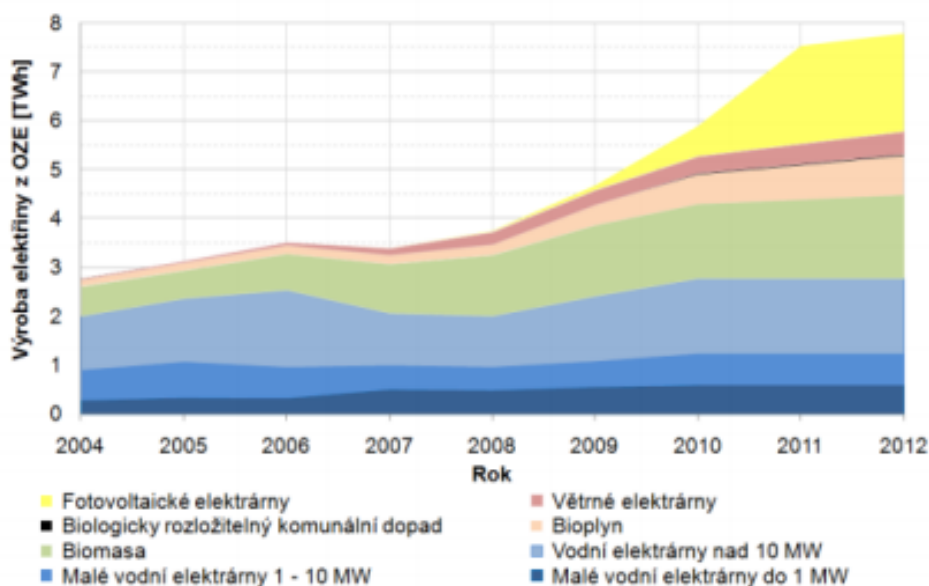
- Vltava (VSR)
- změna zatížení (ZZ30)
- sekundární regulace U/Q (SRUQ)
- schopnost ostrovního provozu (OP)
- start ze tmy (BS)

Výpomoc ze synchronně pracujících soustav:

- havarijní smlouvy,
- operativní dodávka elektřiny ze zahraničí a do zahraničí (EregZ).

## 6. Využití biomasy jako akumulační zdroj energie v elektrických distribučních sítích

Většina OZE je závislých na meteorologických podmínkách. Pokud by se na všechny obnovitelné zdroje nahlíželo jako na jeden celek, tak řešení z hlediska potlačení stochastické výroby se nabízí v jejich vzájemné spolupráci. Společnou výstupní energii tohoto celku by byl stálý okamžitý výkon dle odběrového diagramu. Toho by se dosáhlo za pomoci stabilního obnovitelného zdroje energie, kterým je biomasa. Biomasa se řadí mezi pružné a dynamické zdroje energie, které by byly schopné se přizpůsobovat stochastickým průběhům fotovoltaických a větrných elektráren.



Obr. 6.1: Výroba elektrické energie z OZE [10]

### 6.1 Biomasa

Biomasa patří do skupiny obnovitelných zdrojů. Je to hmota biologického původu nefosilního charakteru. Pochází většinou z rostlinného nebo živočišného původu. Jejich výhodou při spalování je v tom, že nezatěžuje životní prostředí, jelikož množství  $\text{CO}_2$ , které vzniká při jejím spalování, je rovné množství  $\text{CO}_2$ , kterou hmota spotřebovala při svém růstu.

Hlavním ukazatelem při jejich zpracování je nutné dodržet určité technologické podmínky, aby byla zaručena dobrá využitelnost. Jedním z hlavních vlivů ovlivňující kvalitu je množství vody obsažené v biomase, zejména pro spalování. Doporučuje se biomasu vysušit, pod hodnotu 30%, aby nedocházelo k snižování účinnosti při spalovacím procesu.

Při popisu biomasy od úplného začátku se vychází ze slunečního záření, které za její pomoci vzniká endotermická reakce, která se též nazývá fotosyntéza. Z ní vznikají jednoduché cukry, které se při další reakci mění na složité cukry, škroby a jiné látky. Tyto látky se dále v tělech živočichů mění na chemické sloučeniny.



Biomasa má velké využití z hlediska energetického potenciálu. Jejími přednostmi jsou vysoký energetický potenciál a centralizovaná výroba energie. Výroba biomasy v místě spotřeby snižuje energetickou náročnost na dovoz. Hlavní výhodou ve srovnání s ostatními obnovitelnými zdroji je částečné řízení výroby a nezávislé na počasí. Naopak, nevýhodou je malá účinnost využívání sluneční energie při růstu plodin (endotermická reakce). [18]

### **Druh biomasy**

Biomasu je možno rozdělit hned podle několika hledisek a to podle složení nebo původu. Z hlediska složení lze rozdělit na:

- fytomasa s vysokým obsahem lignocelulózy,
- fytomasa olejnatých plodin,
- fytomasa s vysokým podílem škrobu a cukru,
- organické odpady a vedlejší produkty živočišného původu.

Rozdělení podle původu na rostlinné a živočišné.

Rostlinný původ lze dělit na:

- dřevo a dřevní odpady,
- rychle rostoucí rostliny,
- obilniny,
- olejnaté plodiny.

Živočišný původ lze rozdělit na:

- kejdu,
- pevný hnůj,
- kafilerní odpad.

### **Zpracování biomasy**

Pro zpracování biomasy se využívá celé řady chemických procesů. Procesy zpracování biomasy lze rozdělit do několika druhů:

- termochemická přeměna (suchý proces), mezi které patří spalování, zplyňování a pyrolýza,
- biochemická přeměna (mokrý proces): alkoholové a metanové kvašení,
- fyzikální přeměna,
- chemická přeměna.

Nejvíce bývá zpracovávána biomasa pomocí spalování, zplyňování, pyrolýzou a anaerobní fermentace. Jednotlivé metody zpracování jsou popsány podrobněji níže.

### **Spalování**

Pro spalování se využívá zejména suchý materiál, zejména dřevo, sláma a obiloviny. Spalování těchto materiálů bývá prováděno na roštu nebo ve fluidní vrstvě, kdy dochází k exotermické reakci paliva s kyslíkem. Doporučuje se, aby obsah vlhkosti byl menší než 30 %.

Při spalování je nutno sledovat oxid uhelnatý a tuhé zbytky. Pozornost je nutno dávat též oxidu dusíku a oxidů síry. Oxid dusíku vzniká ze vzdušného dusíku a obsaženého v biomase. Množství síry zastoupené v palivu není tak vysoké, jako u uhlí a tudíž se na to nemusí klást velký důraz.

Biomasu je možno spalovat spolu s jiným typem paliva zejména uhlím, kdy dochází ke snižování emisí. Obsah biomasy v zastoupení paliva bývá v množství 5 až 20 %. V ČR využívá tento druh spalování, například elektrárna Tisová, Ledvice, Hodonín a Poříčí. Největší problém, se kterým se setkáváme při této kombinaci paliva, je lepkavost. Použitá biomasa například dřevo, často obsahuje množství vody, která při kontaktu s uhlím vytváří slepování a dochází k ucpávání různých zařízení.

### **Zplyňování**

Materiál při metodě zplyňování se používá zejména dřevní odpad. Pevné palivo se mění na plynné palivo za pomoci zplyňovacích látek. Celkový proces probíhá při teplotě 700 °C až 1100 °C. Zplyňování bývá prováděno ve fluidní vrstvě nebo v pevném loži. Zplyňování dřeva probíhá ve čtyřech fázích sušení, pyrolýza, oxidace a redukce. Vzniklý plyn obsahuje  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  a jiné plyny.

### **Pyrolýza**

Při pyrolýze se využívá stejný materiál jako u zplyňování. Biomasa se mění na palivo vyšší kvality a plyn. Pyrolýza probíhá při teplotě mezi 300 °C až 2000 °C za přístupu nedostatku vzduchu. Zplyňování může probíhat ve dvou procesech a to v oxidativním a reduktivním procesu.

### **Anaerobní fermentace**

Pomocí anaerobní fermentace lze zpracovávat celou řadu materiálů, která probíhá ve čtyřech stupních. Nazývající se hydrolýza, asidogeneze, acetogeneze a metanogeneze obrázek 7.1.

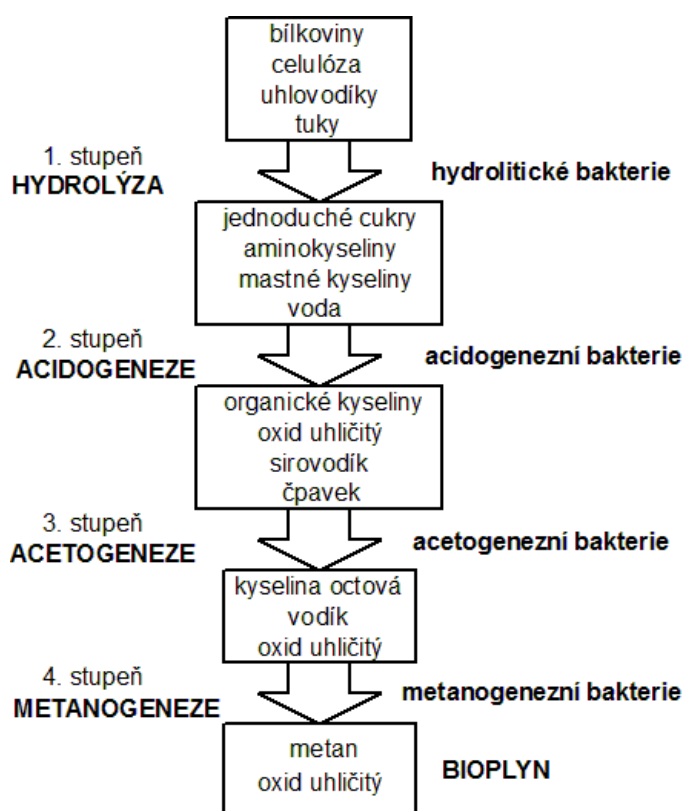
**Jednotlivé stupně:**

Hydrolýza - anaerobní bakterie přeměňují makromolekulární látky na nízkomolekulární sloučeniny (jednoduché cukry, aminokyseliny, mastné kyseliny).

Acidogeneze – při tomto stupni dochází za pomoci acidofilních bakterií k rozkladu na organické kyseliny, oxid uhličitý, sirovodík a čpavek.

Acetogeneze – acetogenezní bakterie mění předchozí stupeň na kyselinu octovou, oxid uhličitý a vodík.

Metanogeneze – v poslední fázi vytváří metanogenezní bakterie oxid uhličitý a metan.



Obr. 6.2: Anaerobní fermentace

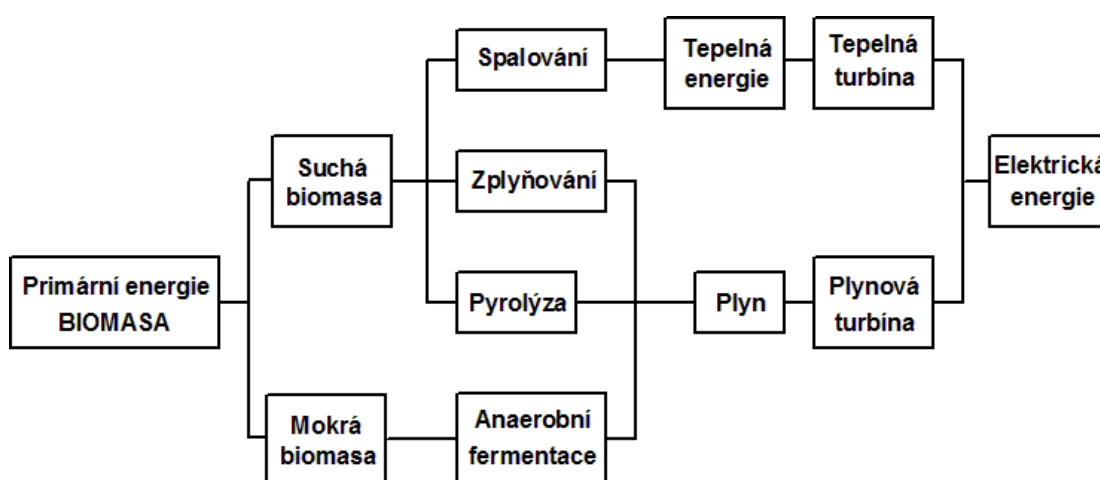
## 6.2 Srovnání jednotlivých zdrojů při výrobě elektrické energie za pomoci biomasy

Obecně biomasu lze rozdělit na suchou a mokrou. Mezi suchou biomasu lze řadit dřevo a dřevní odpad. Naopak, mezi mokrou biomasu patří kupříkladu kejda, kukuřice a zbytky jídla. Suchá biomasa se většinou zpracovává pomocí spalování, zplyňování a pyrolýzy. Mokrou biomasu je nejlepší zpracovávat pomocí anaerobní fermentace. Při metodě spalování získáváme tepelnou energii, kterou dále můžeme využívat k elektrické energii. Při ostatních metodách (zplyňování,

pyrolýza a fermentace) je hlavním produktem plyn, který se možno zpracovávat v plynové turbíně nebo ve spalovacím motoru. Pomocí těchto zdrojů můžeme dále vyrábět za pomoci generátoru elektrickou energii. Zjednodušený popis výroby elektrické energie za pomoci biomasy je zobrazen na obrázku 6.3.

Každá technologie zpracování a následně výroby elektrické energie, má klady a zápory. Metoda spalování je výhodná zejména, pokud požadujeme zdroj o konstantním výkonu po delší dobu provozu. Velkou výhodou oproti ostatním metodám je zásoba paliva (dřevo, dřevní štěpka atd.), která nevyžaduje zvláštní nároky.

Při zpracovávání plynu z biomasy se většinou setkáváme se spalovacími motory, které jsou levnější a pohotové z hlediska uvedení do chodu. Naopak, velkou nevýhodou spalovacích motorů je častá údržba a poruchovost. Ve srovnání se spalovacím motorem, který se skládá z několika pohyblivých částí, plynová turbína se skládá pouze z jedné pohyblivé části, a tou je rotor.



Obr. 6.3: Výroba elektrické energie z biomasy

Každé technologické zpracování vyhovuje různým požadavkům při výrobě elektrické energie. Pro zálohování výkonu fotovoltaické a větrné elektrárny je potřeba velmi časově pružný zdroj. Tomuto požadavku vyhovuje nejlépe spalovací motor, který je schopen poskytnout plný elektrický výkon už během pěti minut. Je mu možno dodávat plyn za pomoci různých technologických metod. Při rozhodování je nutno brát v úvahu kvalitu plynu (výchřevnost, škodlivé látky, vlhkost, atd.) a množství vyrobeného plynu. Za pomoci anaerobní fermentace jsme schopni vyrobit kvalitní a velké množství plynu ve srovnání s technologií zplyňování a pyrolýzy. Vyrobenému plynu za pomoci metody anaerobní fermentace se říká bioplyn, který je podrobněji popsán v následující kapitole.

## 6.3 Bioplyn

### 6.3.1 Vlastnosti

Bioplyn je vyráběn za pomoci anaerobní fermentace z organických materiálů, skládající se z metanu  $\text{CH}_4$ , oxidu uhličitého  $\text{CO}_2$ , vodní páry, dusíku, kyslíku, vodíku, sulfanu a jiných plynů. Hlavní ukazatelem kvality bioplynu je koncentrace metanu, která se pohybuje v rozmezí 40 až

70 %. Zastoupení metanu v jeho objemu ovlivňuje výhřevnost bioplynu. Pohybuje se v rozmezí 6 až 8 kWh.m<sup>-3</sup>.

### 6.3.2 Zásobníky bioplynu

Zásobníky plynu, nebo-li plynojemy, složí k vyrovnání výkyvů mezi odběrem a výrobou plynu. Plynojemy lze dělit podle několika kritérií. Jedním z nich je podle tlaku, kdy je dělíme na nízkotlaké a vysokotlaké. Plynojemy lze dále dělit na mokré a suché.

Mokrý plynojem se skládá z válcové nádoby, která je do určité výšky naplněná vodou, ve které je ponořena další válcová nádoba (dnem vzhůru). Přiváděný plyn pod zvon, dochází k nárůstu tlaku a tím je zvon nadzvedán a vzniklý prostor je s dalším přívodem plynu zvětšován až na plnou kapacitu plynojemu.

Suchý plynojem se skládá z velké válcové nádoby, ve které se pod tlakem pohybuje vodorovná deska, pod níž jsme si schopni představit tzv. píst, který odděluje uskladňovací prostor od okolí.

Vysokotlaké plynojemy se skládají z kulové nebo válcové tlakové nádoby, ve kterých je plyn pod tlakem řádově MPa. Jejich výhodou je menší objem plynojemu. Naopak nevýhodou jsou vysoké tlaky.

## 7. Regulace výkonu biomasy

Biomasa je velmi významná z hlediska náhrady „chybějícího“ výkonu, například ze solární či větrné elektrárny. Při zálohování daného zdroje je nutno si zvolit na jakou hodnotu, tedy jaký průběh chceme regulovat. [19]

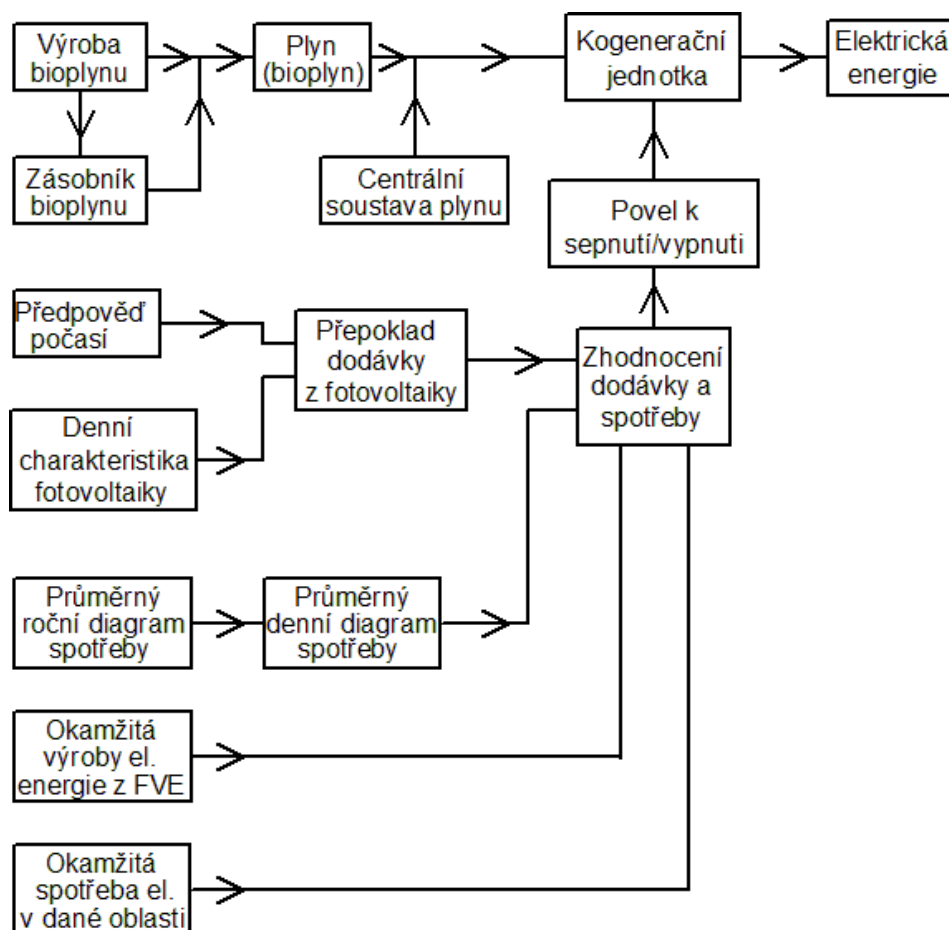
Možné regulace výkonu mohou být:

- na konstantní dodávku elektrické energie do sítě,
- podle průměrného denního diagramu spotřeby,
- podle spotřeby v daném místě.

### 7.1 Blokové schéma regulace solární elektrárny pomocí bioplynu

Pro pokyn k sepnutí záložního výkonu je zapotřebí znát jeho posuzovací podmínky. Zjednodušené schéma znázorňující regulaci výkonu je zobrazeno na obrázku 7.1. Jednotlivými podmínkami k jejich vyhodnocení jsou:

- zásoba bioplynu,
- předpověď počasí,
- denní charakteristika fotovoltaiky,
- průměrný denní diagram spotřeby,
- okamžitá výroba elektřiny z FVE,
- okamžitá spotřeba elektřiny v dané oblasti.



Obr. 7.1: Výroba elektrické energie z biomasy

Zásoba bioplynu je zásadní podmínkou k provozu kogenerační jednotky. Plyn nemusí být zrovna dodáván z bioplynových zásobníků, ale může se využívat centrální soustavy plynu, nebo též virtuálního plynovodu.

Předpověď počasí je možno získat už několik dnů dopředu. A tudíž jsme schopni předpovídat množství potřebného bioplynu.

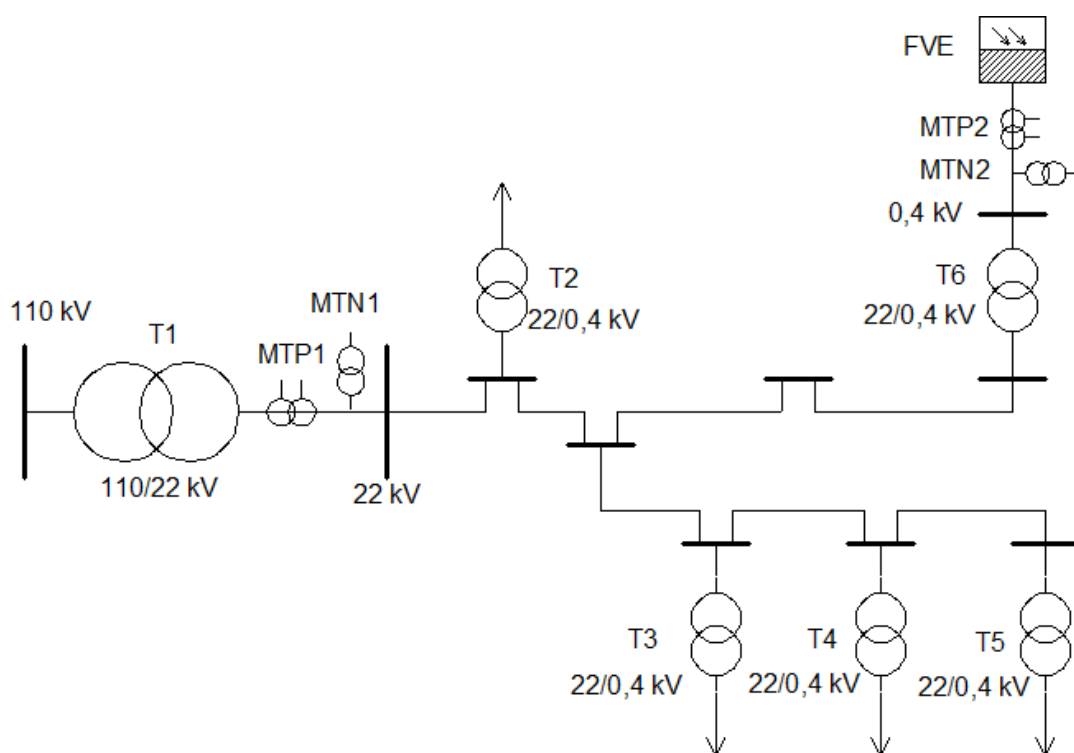
Denní charakteristika fotovoltaiky si je možno představit jako předpokládaný průběh vyráběného výkonu z fotovoltaické elektrárny. V ranních hodinách výkon začíná narůstat a v poledních hodinách dochází k maximu a následně pomalu klesá její výkon.

Průměrný denní diagram spotřeby jsme schopni předpokládat při zhodnocení předchozích odběrů. Při vyhodnocení je nutno rozlišovat odběrový diagram na pracovní a víkendové dny.

Okamžitá výroba elektřiny z FVE a okamžitá spotřeba elektřiny v dané oblasti je většinou měřena pomocí měřících transformátorů napětí a proudu. Tyto hodnoty jsou vyhodnocovány pomocí měřících členů a bývají tyto hodnoty zaznamenávány.

## 8. Vyhodnocení regulace solární elektrárny v distribuční síti

Data byly získány z FVE o výkonu ( $P_{FVE}$ ) 1,1 MWp, nacházející se u obce Starojická Lhota. Zjednodušené schéma zapojení fotovoltaické elektrárny pracující do distribuční sítě je na obrázku 8.1. Paprskové vedení je napájeno z transformátoru T1, který má převod 110/22 kV. Fotovoltaická elektrárna je připojena přes transformátor 0,4/22 kV do sítě 22 kV. Distribuční vedení obsahuje větší množství odběrů, v obrázku 8.1 je vyznačena pouze část odběrů, z důvodu lepší přehlednosti. Schéma zapojení obsahuje měřicí transformátory napětí a proudů (MTN, MTP), pomocí kterých bylo provedeno měření se záznamem. Na vývodu 22 kV z transformátoru T1 byla měřena dodávka výkonu do distribuční sítě. Další měření bylo provedeno na napětěové hladině 0,4 kV u FVE, kde byl změřen dodávaný výkon z FVE do distribuční sítě.



Obr 8.1: Zapojení FVE do distribuční sítě

Měření bylo provedeno v roce 2011, kdy byly získány hodnoty v minutových intervalech. Ty se upravily na pětiminutové průměry pro usnadnění práce s nimi. Tato práce řeší zhodnocení naměřených hodnot za měsíc duben.



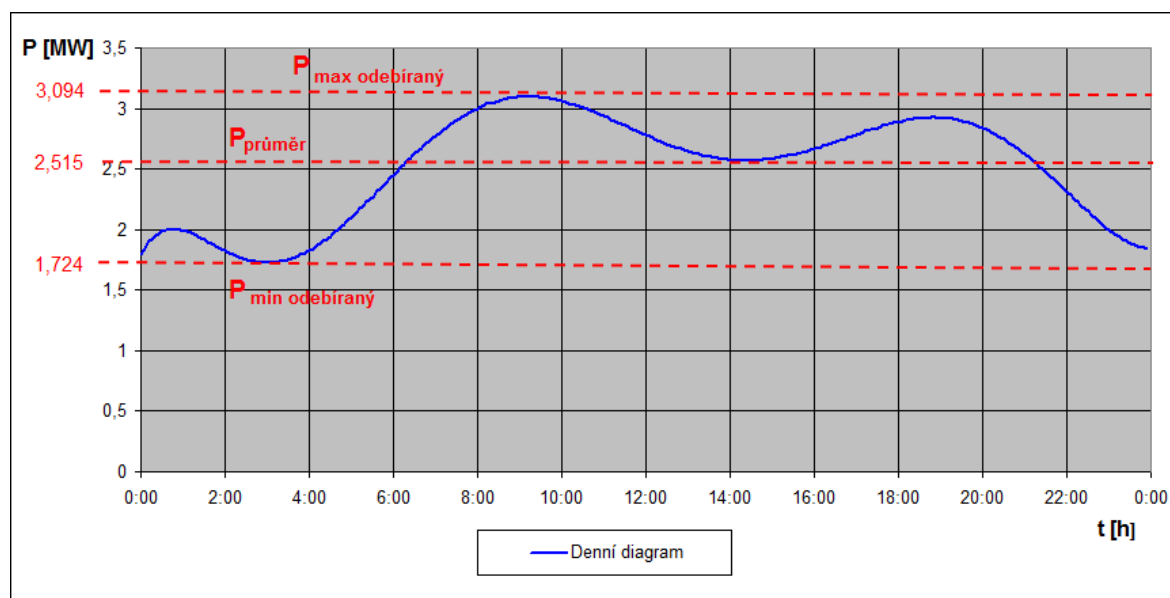
Změřeny byly následující parametry v minutových intervalech:

- napětí,
- proud,
- činný výkon,
- jalový výkon,
- zdánlivý výkon,
- účinník.

Pro vyhodnocování byl použit pouze činný výkon. Z naměřených hodnot byl vyhodnocen průměrný odběrový diagram. Tento průběh byl za pomoci náležité funkce proložen. Program vyhodnocující průběh je popsán funkcí osmého polynomu (8.1). Pro dosažení lepší přesnosti byly rozděleny hodnoty do pracovních a víkendových dnů. Rovnice (8.1) popisuje pracovní dny, které jsou přesnější, než rovnice popisující víkendové dny. A to z důvodu většího množství hodnot při vyhodnocování.

$$P = 1,79528 + 0,0105233 \cdot t - 0,000169499 \cdot t^2 + 9,37263 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 2,32474 \cdot 10^{-9} \cdot t^4 + 3,00525 \cdot 10^{-12} \cdot t^5 - 2,10558 \cdot 10^{-15} \cdot t^6 + 7,56915 \cdot 10^{-19} \cdot t^7 - 1,09185 \cdot 10^{-22} \cdot t^8 \quad (8.1)$$

[21]



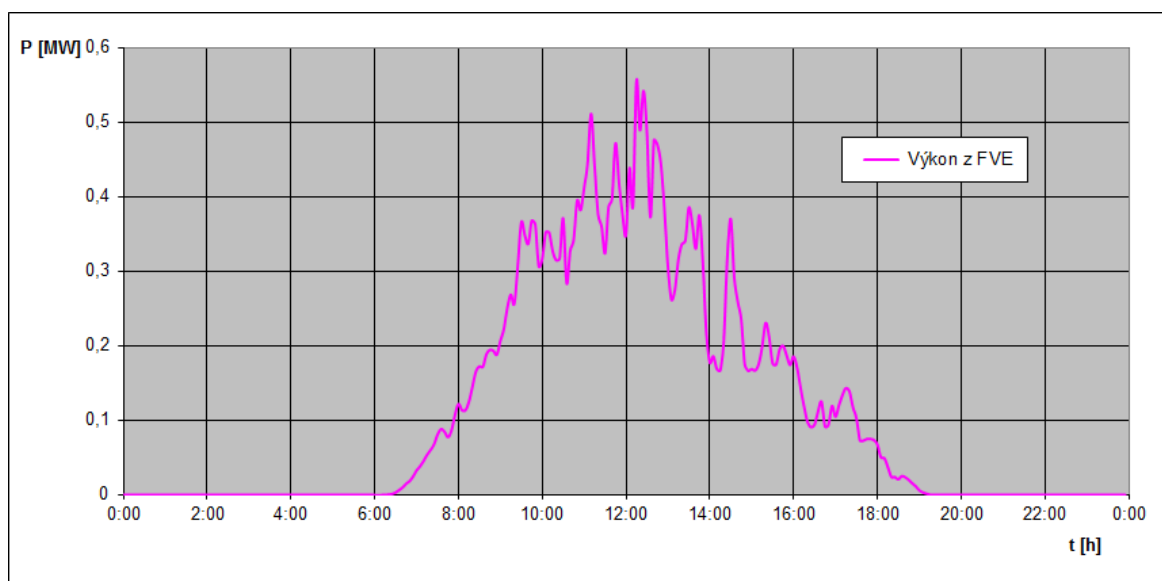
Graf. 8.1: Průběh denního diagramu

Z průběhu denního diagramu je možno usoudit, že se podobá průměrnému dennímu diagramu. Na základě grafu 8.1 je možno vidět, že minimální odebíraný výkon je 1,724 MW a

maximální odebíraný výkon je 3,094 MW. Rozdíl mezi maximálním a minimálním odběrem je 1,37 MW. Průměrný odběrový výkon odpovídá hodnotě 2,515 MW.

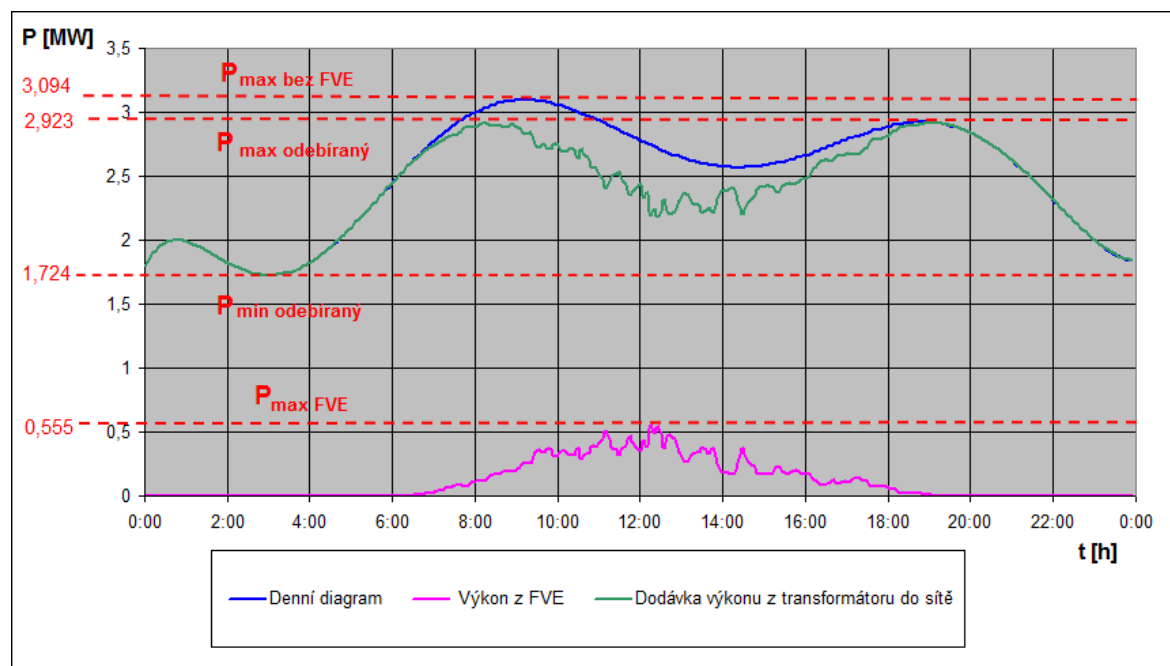
Denní diagram se vyznačuje dvěma kritickými hodnotami. Prvním z nich je minimální odebíraný výkon, se kterým se setkáváme v obdobích 0:00 a 3:00 hodin. Dalším kritickým parametrem je zvýšený odběrový výkon, který má také dvě kritická období. První nárůst nastává v ranních hodinách kolem 6:00 hodin, kdy pozvolna dochází k nárůstu výkonu. Období 9:00 je možno považovat za období maximálního odběru. Následně dochází k poklesu odběrového výkonu, který se pohybuje v časovém období 12:00 hodin. Další velký odběr se pohybuje v čase mezi 17:00 až 21:00.

Průměrný dodávaný výkon z FVE za měsíc duben je zobrazen v grafu 8.2. Z průběhu je možno pozorovat, že výkon má parabolický průběh. Při analýze průběhu je možno pozorovat její stochastiku, která je velmi proměnná. V ranních a večerních hodinách je stochastika vyráběného výkonu pozvolná a je možno předpovídat její výkon ve srovnání s poledními a odpoledními hodinami. To je způsobeno difúzní složkou záření, která je zastoupena spolu s přímým slunečním zářením. V ranních a odpoledních hodinách je difúzní složka silně zastoupena ve srovnání s přímým slunečním zářením. Průměrný maximální výkon FVE v daném měsíci je 0,555 MW.



Graf. 8.2: Průběh průměrného výkonu z FVE

Připojením fotovoltaické elektrárny do dané sítě, dochází ke snížení v dodávce výkonu do distribuční sítě z vnější sítě. Výsledný průběh výkonu je zobrazen v grafu 8.3 za pomoci zelené křivky. Velkou výhodou je, že dochází ke snížení rozptylu, dodávaného výkonu do distribuční sítě. Horní mez rozptylu výkonu se změnil z 3,094 MW na 2,924 MW, a to je o 171 kW. Spodní mez rozptylu se téměř nezměnila, zůstala na stejné hodnotě 1,724 MW.

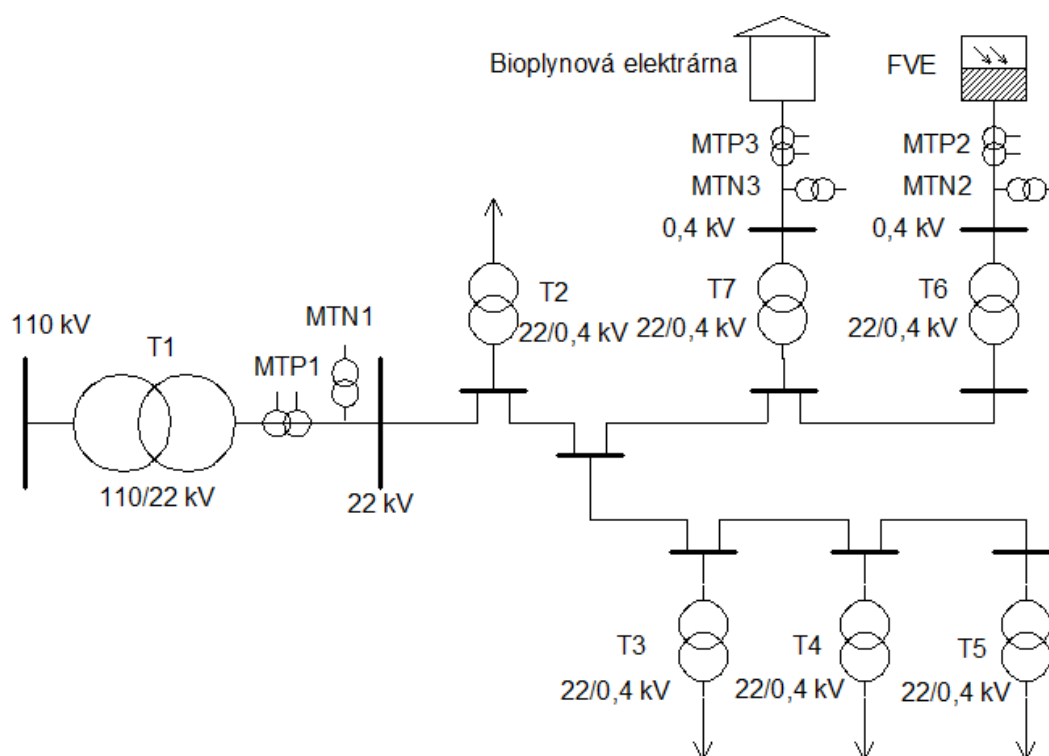


Graf. 8.3: Průběh denního diagramu při dodávce z FVE

Zapojená fotovoltaická elektrárna do distribuční sítě způsobí snížení dodávaného výkonu, ale nevyrovná špičky odebíraného výkonu. Tyto změny je možno vyregulovat za pomoci záložního zdroje, který je sepnut při zvýšené spotřebě výkonu. Pro tuto zálohu byl zvolen fiktivní výkon kogenerační jednotky o velikosti 1 MW, která je zásobovaná bioplynem z bioplynové stanice.

Regulace výkonu je možno provádět několika způsoby, a to skokově nebo dynamicky. Prvním popsaným způsobem je skoková regulace, která může být provedena pomocí několika stupňů. Při regulaci je nutno si zvolit meze, ve kterých se bude regulovat výkon. Nejlepší možností je regulace dynamická na konstantní hodnotu odběrového výkonu z vnější odběrové sítě. Při tomto konstantním odběrovém výkonu přispíváme ke stabilitě sítě. To bývá velmi ovlivněno při odběrových špičkách, které se objevují v ranních a večerních hodinách. Udržení výkonu na konstantní hodnotě je velmi problematická a to hned z několika hledisek. Prvním z nich je rychlost dodávky, která je ovlivněna měřicími a vyhodnocujícími prvky. Další problémem je regulace záložní jednotky. Tento způsob regulace je velmi nákladný, ale do budoucna se počítá s jejich nasazením. Proto je nutno si zvolit výkonové meze, ve kterých se bude regulace pohybovat. Nejlepší možností je s co nejmenšími změnami, ovšem s nimi přichází různé problémy. Pro podrobné seznámení s dodávkou výkonu ze záložního zdroje v dané oblasti byla provedena simulace na skutečných hodnotách z FVE. Meze regulovaného výkonu jsou velmi různé, které jsou ovlivňovány velikostí regulačního výkonu a jejich regulačními stupni. U každého druhu regulace je hlavním cílem dosáhnout co nejmenší výkonové odchylky.

Na obrázku 8.2 je zobrazeno schéma distribuční sítě podobné jako v obrázku 8.1. Toto schéma je doplněno o bioplynovou elektrárnu, která je připojena za pomoci transformátoru T7 do místní distribuční sítě. Pomocí tohoto zdroje je provedena regulace výkonu v dané oblasti.



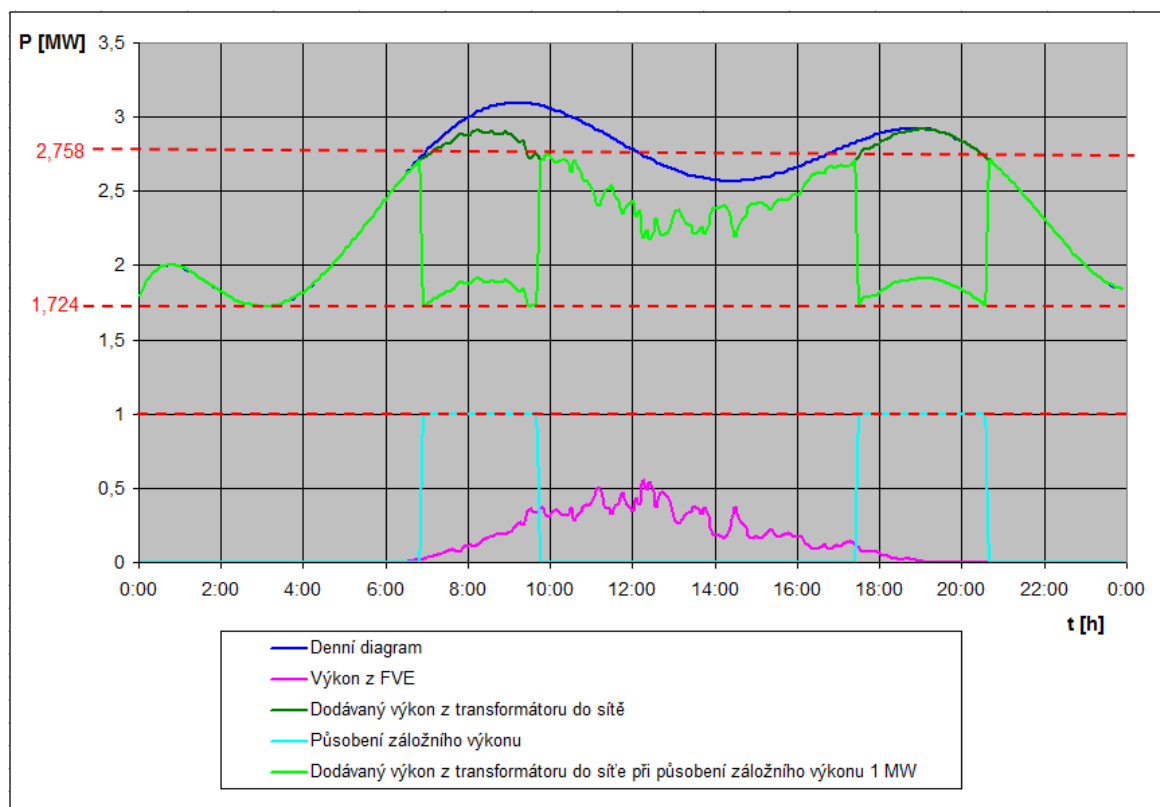
Obr 8.2: Zapojení FVE do distribuční sítě

Simulované regulační výkony jsou následující:

- skoková jednostupňová (1 MW),
- skoková dvoustupňová (1 MW a 0,5 MW),
- skoková vícestupňová (0,8 MW, 0,7 MW, 0,6 MW a 0,5 MW),
- dynamická.

## 8.1 Regulace skoková „jednostupňová“

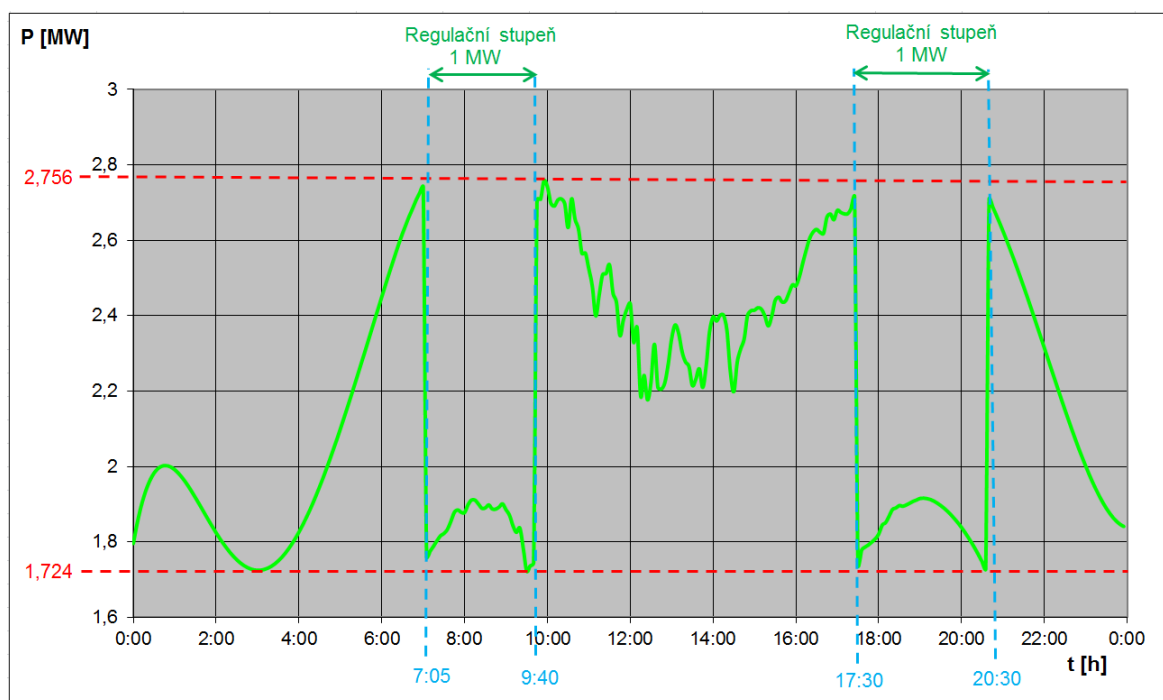
Regulace výkonu skokově za pomoci spínání plného výkonu 1 MW je zobrazena v grafu 8.4. Tento způsob regulace je doprovázen velkými změnami ve velmi krátkém časovém okamžiku. Tyto změny silně ovlivňují elektrickou síť. Při takto náhlé změně výkonu může docházet k flikru, špatné funkci ochran a jiným problematickým změnám.



Graf. 8.4: Skoková regulace plným výkonem 1 MW

Detailní průběh těchto výkonových změn je zobrazen v grafu 8.5. Největší problém nastává při spínání a vypínání těchto jednotek. S těmito periodami cyklů se celkově setkáme dvakrát za den. První z nich nastává v ranních hodinách v 7:05, kdy dochází k sepnutí plného výkonu 1 MW. Tento výkon je sepnut až do 9:40 hodin, kdy dochází k odpojení tohoto výkonu. V průběhu sepnutého výkonu nedochází k významným změnám z pohledu výkonu. Druhá perioda sepnutí regulačního stupně je provedena v 17:30 a vypnuta ve 20:30. V tomto regulačním období nenastávají taktéž významné změny. Při této jednostupňové regulaci je sníženo výkonové rozpětí z 1,199 MW na 1,034 MW, což odpovídá výkonové změně o 0,165 MW. Za pomoci této regulace nedochází k významným změnám ve snížení výkonového rozpětí.

Tohoto způsobu by bylo možno využívat jako výpomoc v krytí odběrových špiček výkonu i pro rozsáhlé sítě. Výhoda této metody spočívá ve vysoké účinnosti, kdy vyrábějící jednotka pracuje při jmenovitém výkonu (100 % výkonu).

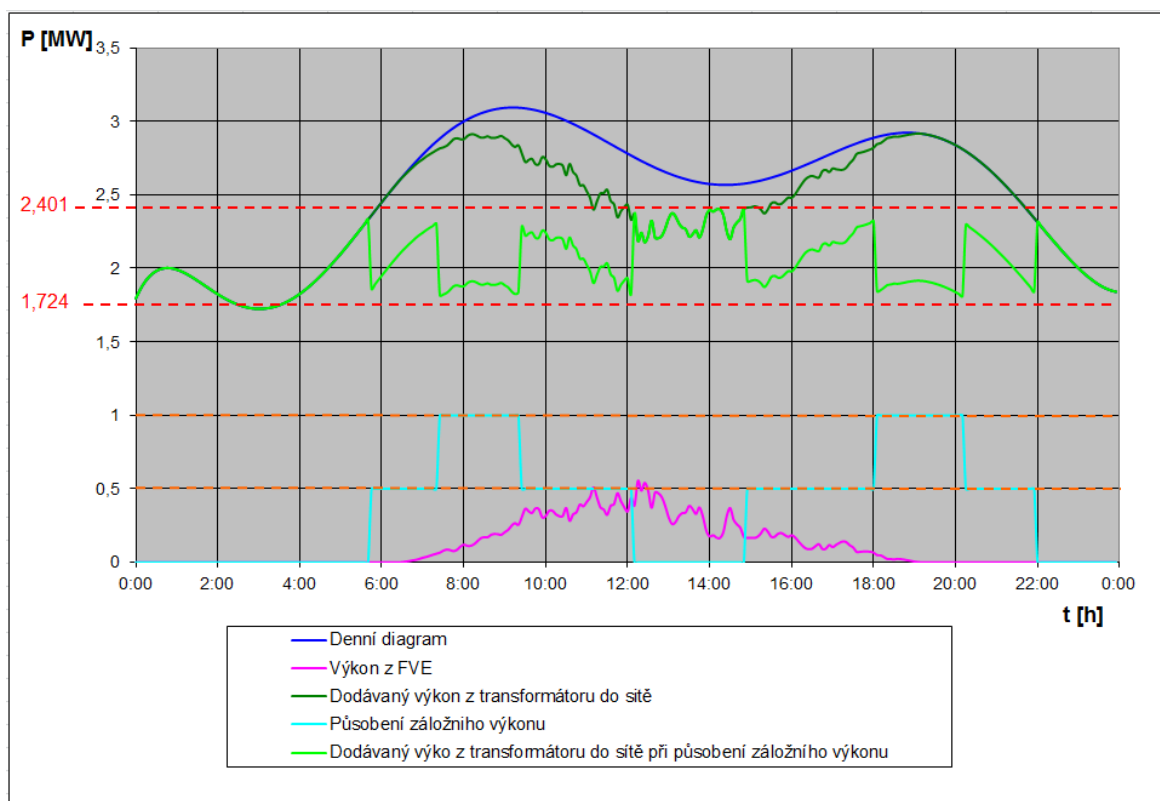


Graf. 8.5: Detail dodávaného výkonu s jednostupňovou regulací (1 MW)

## 8.2 Regulace skoková „dvoustupňová“

Dvoustupňová regulace je provedena za pomoci spínání výkonu 1 MW a polovičního jmenovitého výkonem 0,5 MW. Tento poloviční výkon byl zvolen z důvodu účinnosti. Snížení výkonu pod hranici 50 % jmenovitého výkonu dochází k významnému snížení účinnosti kogenerační jednotky. Při změně výkonu z 1 MW na 0,5 MW nedochází k tak významné změně účinnosti, jako při změně pod 50 % jmenovitého výkonu. Tento problém s účinností je možno odstranit použitím dvou stejných jednotek o jmenovitém výkonu 0,5 MW.

Požadovaný regulační výkon ve špičkách má parabolický průběh, který se dá z části vyregulovat za pomoci spínání jednotlivých stupňů. Při dvoustupňové regulaci dochází ke spínání dvou výkonových rozsahů. V první části je sepnut 50 % jmenovitý výkon, při dalším nárůstu potřebného výkonu dochází k sepnutí plného výkonu (100 % jmenovitého výkonu). Princip této dvoustupňové regulace je zobrazen v grafu 8.6.

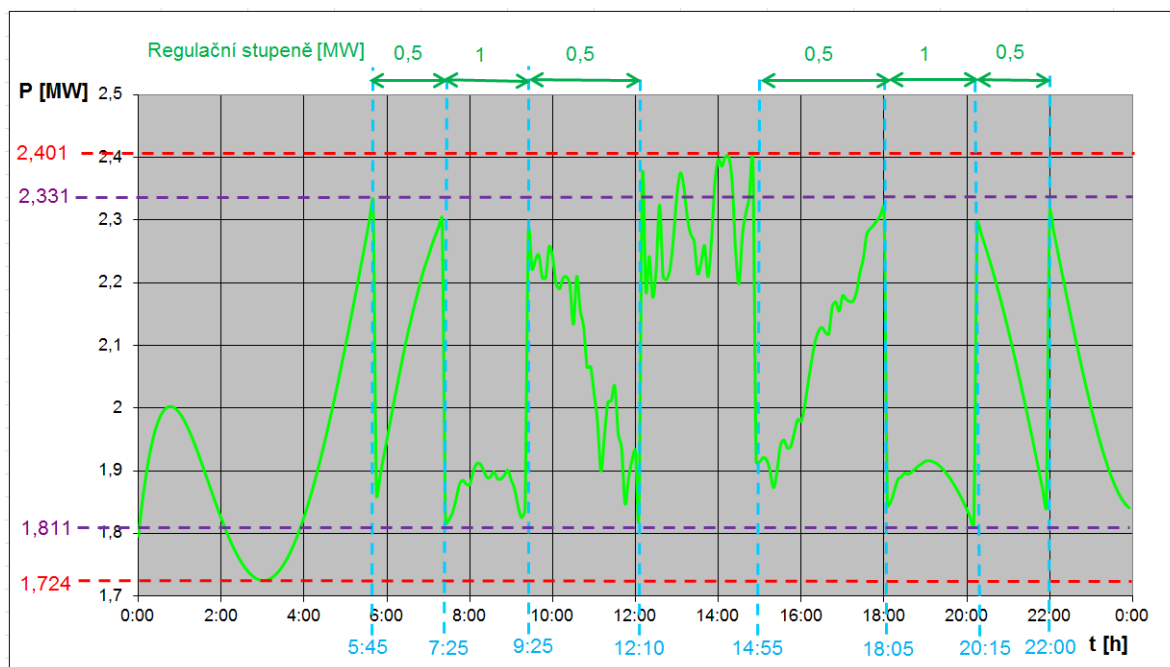


Graf. 8.6: Skoková regulace dvoustupňová, výkonem 0,5 MW a 1 MW

Pro podrobné seznámení s touto regulací, byl vytvořen graf 8.7, který zobrazuje detailní průběh výkonu. V horní části grafu jsou zobrazeny meze jednotlivých stupňů regulace, ve spodní části jsou zvýrazněny časy jednotlivých změn regulace.

První regulační stupeň o výkonu 0,5 MW nastává v 5:45. Další regulační stupeň je 1 MW, který je sepnut v 7:25, ten trvá do 9:25 a následně je sepnut regulační stupeň 0,5 MW a to do 12:10. V časovém horizontu 12:10 až 14:55 neprobíhá žádná regulace. Další působení regulace nastává ve 14:55, kdy je sepnut výkon 0,5 MW do 18:05. Od této doby je zvýšen výkon o 0,5 MW na 1 MW do 20:15. Následně od 20:15 je snížen výkon na 50 % do 22:00 hodin.

Z grafu 8.7 je vidět, že výkon během regulace má pilovitý průběh. Při této dvoustupňové regulaci je možno pozorovat velmi významné změny při spínání regulačních stupňů. Výkonové rozpětí se změnilo z původních 1,199 MW na 0,677 MW. To představuje snížení až o polovinu z původního rozptylu. Detail průběhů regulace při dvoustupňové regulaci je v grafu 8.7, kde je možno pozorovat, že během regulace dochází ještě k dalšímu snížení rozptylu výkonu, a to z 1,81 MW na 2,331 MW což odpovídá 0,48 MW. Při srovnání regulačního stupně 0,5 MW působící od 5:45 do 7:25 s regulačním stupněm 0,5 MW v období od 9:25 do 12:10 je vidět, že druhý regulační stupeň je doprovázen významnými výkonovými změnami, které jsou způsobeny proměnným výkonem z FVE.



Graf. 8.7: Detail dodávaného výkonu s dvoustupňovou regulací (1 MW a 0,5 MW)

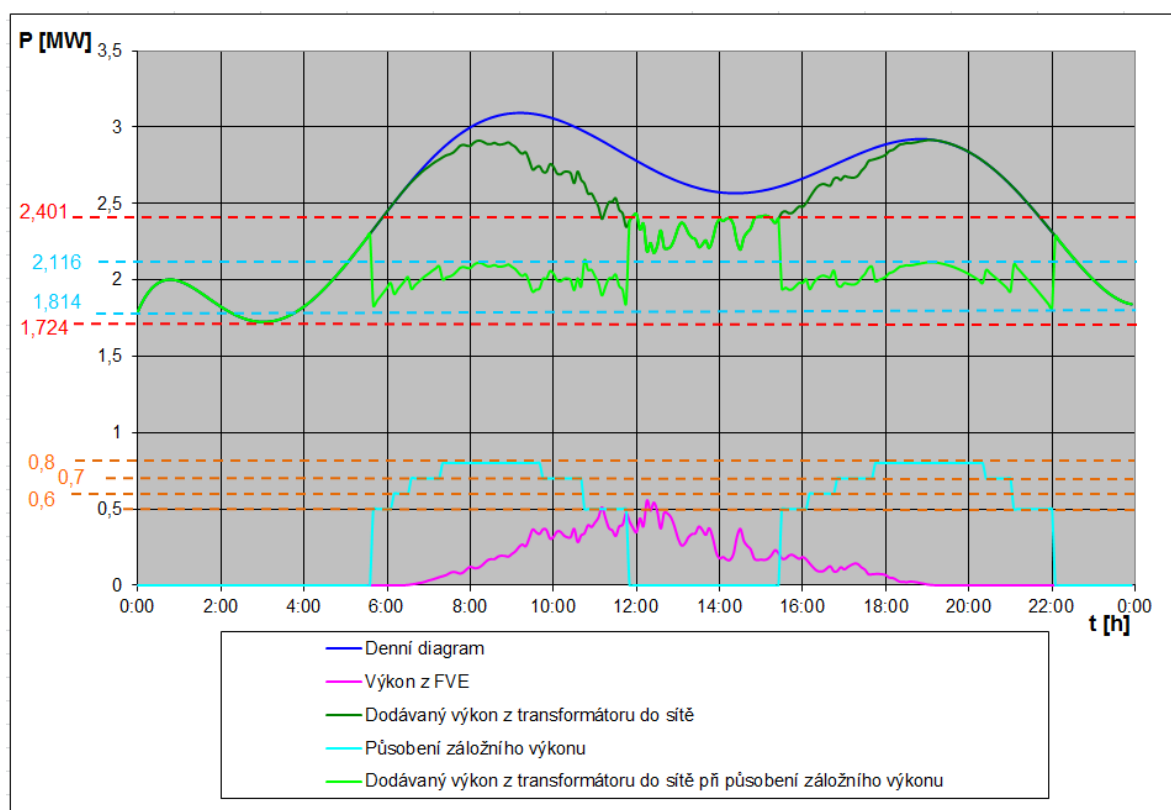
### 8.3 Regulace skoková „vícestupňová“

Vícestupňová regulace je provedena za pomoci několika stupňů, které jsou spínány podle potřeby. Při této regulaci jsou použity výkonové regulační stupně, které jsou 1 MW, 0,9 MW, 0,8 MW, 0,7 MW, 0,6 MW a 0,5 MW. Rozsahů 1 MW a 0,9 MW nebylo zapotřebí při regulaci. Nejmenší regulační rozsah je použit o výkonu 0,5 MW, a to z důvodu účinnosti, kdy se nedoporučuje provoz jednotky pod 50 % jmenovitého výkonu. Jak už bylo vysvětleno v předchozích skokových metodách regulace, tak i tato vícestupňová regulace pracuje na podobném principu. Pouze s tím rozdílem, že má více regulačních stupňů. U této regulace je použito šest stupňů, ale byly využity pouze čtyři stupně. Praktická modelace je provedena v grafu 8.8.

Největší problém, který nastává u této regulace jsou stejné, jako u předchozích regulací, který spočívá ve spínání a vypínání jednotlivých stupňů regulace. Při němž vznikají velké výkonové rozdíly v poměrně krátkém časovém úseku. Ve srovnání s předchozí (dvoustupňovou regulací), jsou tyto změny o něco menší.

U vícestupňové regulace dochází ke stejnému snížení rozptylu výkonu jako u dvoustupňové regulace a to 0,677 MW z původního rozptylu 1,199 MW. Rozptyl výkonu za období regulace je v rozsahu od 1,814 MW až 2,116 MW, což odpovídá výkonovému rozptylu 0,302 MW.

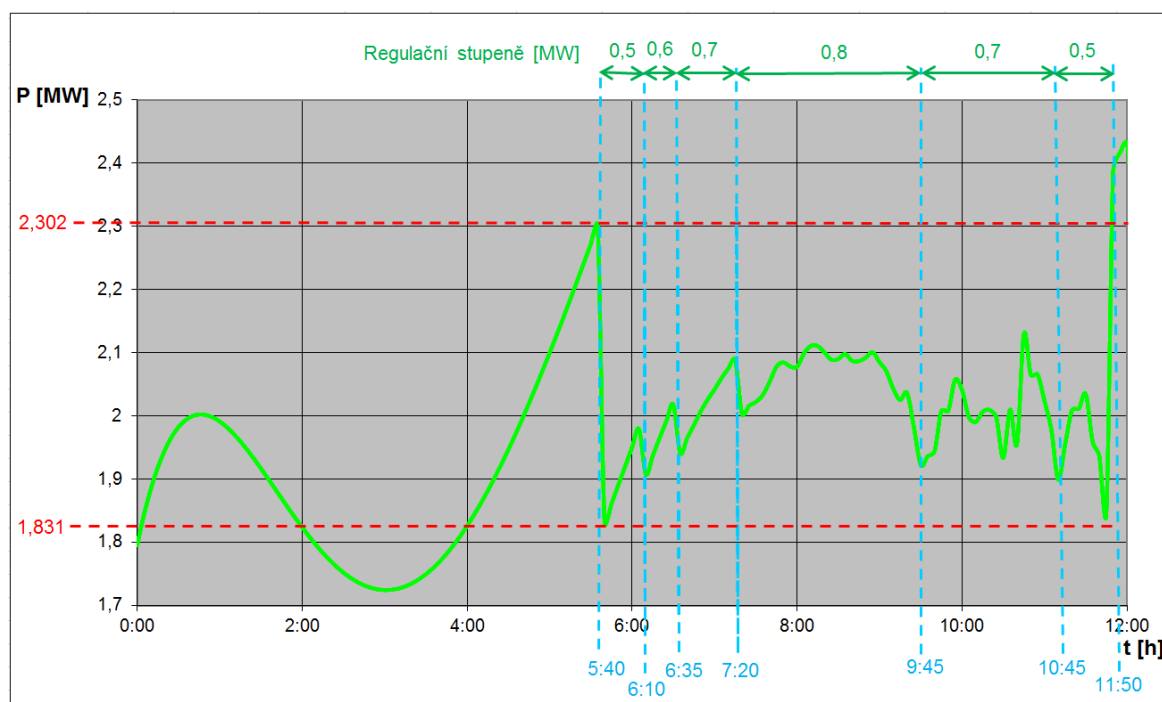




Graf. 8.8: Skoková regulace vícestupňová

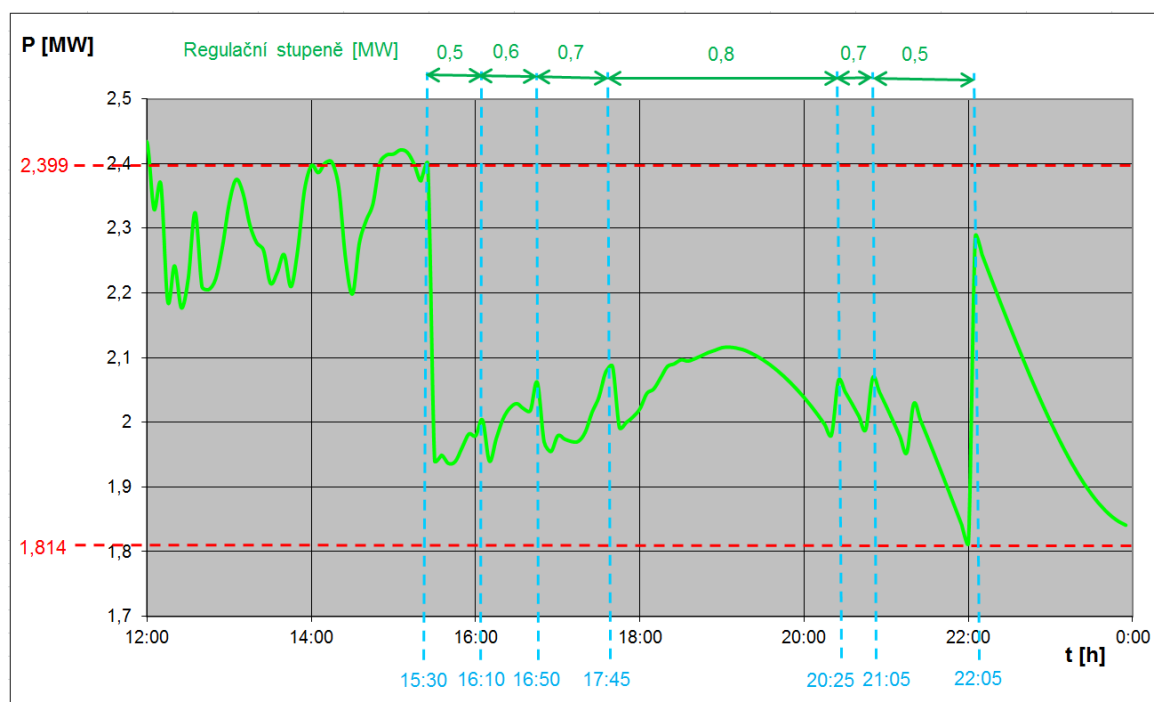
Pro podrobné seznámení s regulačními stupni byl vytvořen detail průběhu výkonu. Tento průběh byl z důvodu lepšího zhodnocení rozdělen do dvou částí. První část je v časovém horizontu od 0:00 do 12:00, další část je od 12:00 do 0:00. Tyto průběhy jsou zobrazeny v grafu 8.9 a 8.10.

Dopolední vícestupňová regulace je zobrazena v grafu 8.9. Jako první regulační stupeň je 0,5 MW, který je sepnut v čase 5:40. Postupně s nárůstem požadovaného výkonu nastává spínání jednotlivých stupňů, a to až do výkonu 0,8 MW. V čase 9:45 dochází ke snížení výkonu na 0,7 MW. Snižování stupňů regulace je spojeno s poklesem potřebného výkonu. V období 10:45 dochází k poklesu výkonu až o dva regulační stupně z 0,8 MW na 0,6 MW. Spínání jednotlivých stupňů způsobuje pilový průběh, který opisuje parabolou v úseku regulace. Největší změny v průběhu výkonu vznikají při spínání a vypínání regulace, v této regulaci nenastávají tak významné změny jako u předchozích dvou regulací.



Graf. 8.9: Detail dodávaného výkonu s vícestupňovou regulací od 0:00 do 12:00

Večerní vícestupňová regulace je podrobně popsána v grafu 8.10. V této části regulace jsou použity stejné stupně regulace, jako u předchozí dopolední vícestupňové regulace. Regulace začíná působit v 15:30 o prvním výkonovém stupni 0,5 MW. Následně dochází k postupnému připínání dalších požadovaných stupňů až do maximálního požadovaného stupně o výkonu 0,8 MW. Tento výkon je snížen na 0,7 MW v čase 20:25. A postupně dochází ke snižování výkonových stupňů. V čase 21:05 dochází k poklesu výkonu až o dva stupně z 0,7 MW na 0,5 MW. Regulační výkon je vypnut v čase 22:05. Největší výkonové změny nastávají v době zapnutí a vypnutí regulace, které jsou důsledkem sepnutí a vypnutí regulačního stupně 0,5 MW.



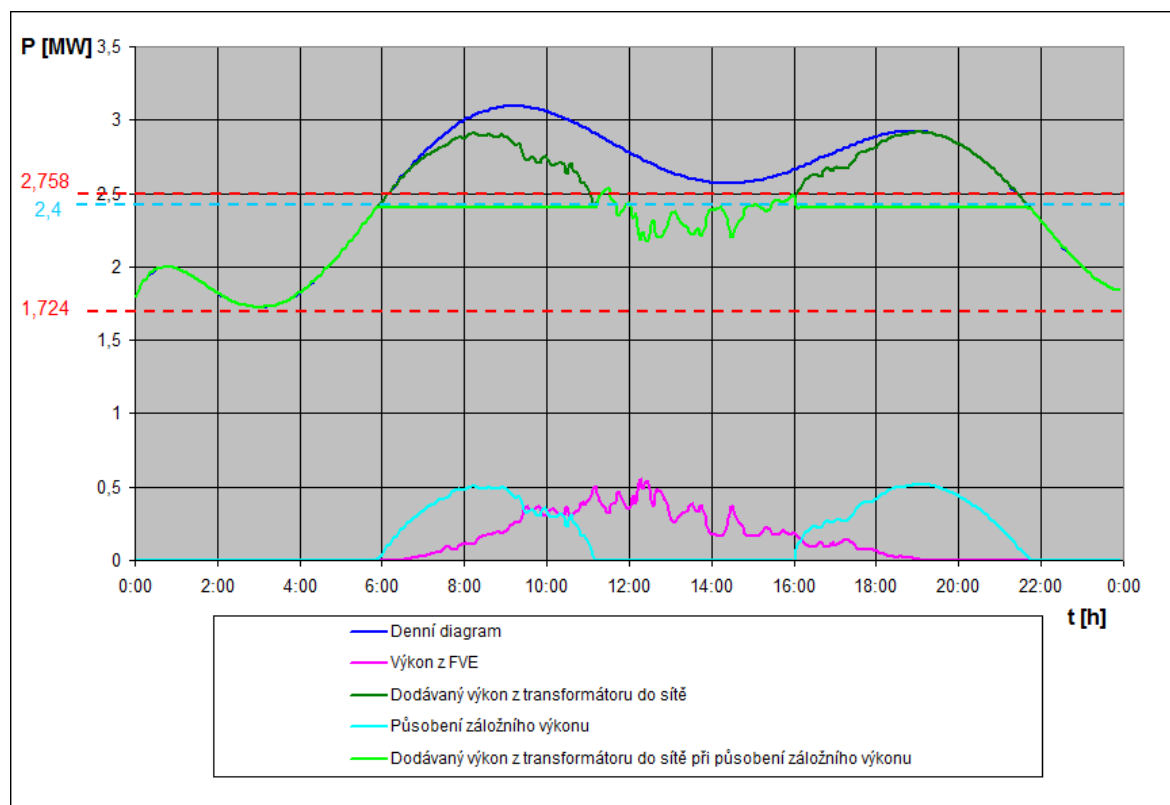
Graf. 8.10: Detail dodávaného výkonu s vícestupňovou regulací od 12:00 do 0:00

## 8.4 Regulace dynamická

Tento způsob regulace je ze všech ostatních metod nejpříjemnější, a to z hlediska držení konstantní hodnoty dodávky výkonu do dané oblasti. Obecně tuto regulaci je možno považovat za ideální. Regulace požadovaného výkonu ze záložního zdroje probíhá plynule podle potřebného výkonu. Průběh regulace je zobrazena v grafu 8.11. U této regulace se musí rozhodnout o hodnotě výkonu, na kterou se bude výkon v síti regulovat. V tomto případě byla zvolena hodnota výkonu 2,4 MW.

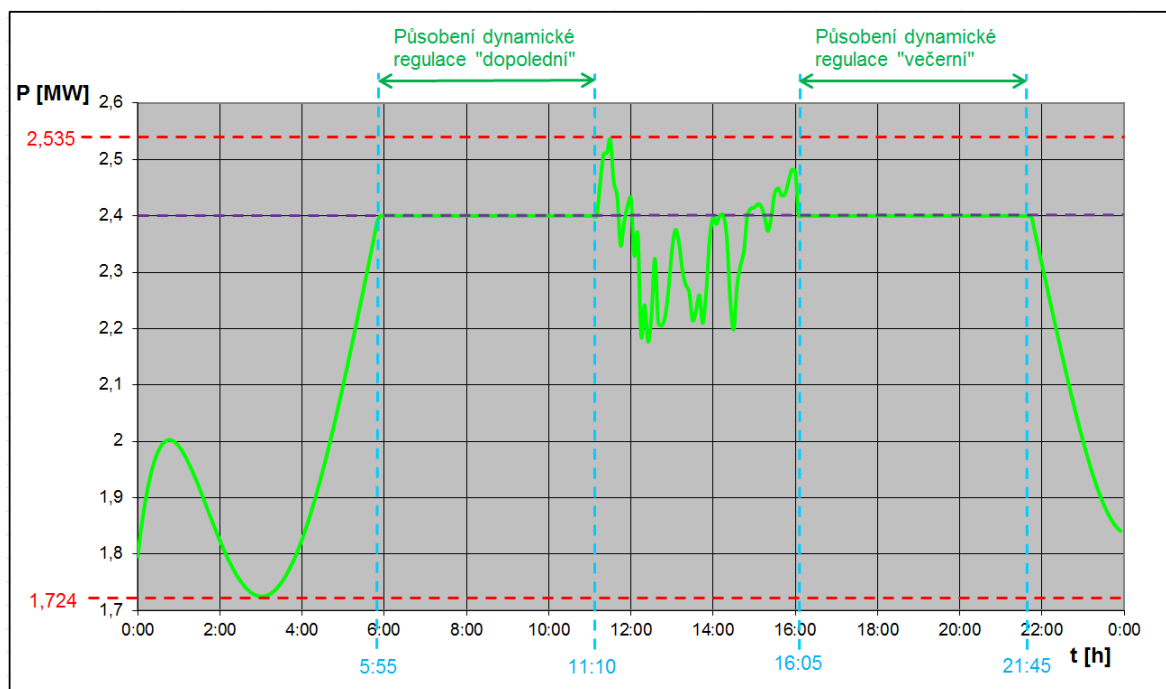
Pomocí této regulace, jsme byli schopni vyregulovat výkon v síti během celých dvaceti čtyř hodin. To by bylo velice zajímavé, ale naopak příliš nákladné a složité. Proto musíme nalézt takový výkonový a časový rozsah regulace, pro který to bude výhodné nejlépe ze všech směrů. Hlavní nevýhodou této regulace z hlediska záložní jednotky je plynulá změna výkonu. Tato regulace je velmi problematická z pohledu získávání informací pro regulátor výkonu, kdy jsou zapotřebí velmi přesná měřicí zařízení pracující s okamžitými hodnotami.

Dalším velkým problémem je účinnost jednotky. Charakteristika požadovaného výkonu je velmi pozvolná, která silně ovlivňuje účinnost stroje. Ale z pohledu elektrické sítě je to nejlepší možná varianta regulace.



Graf. 8.11: Regulace dynamická

Podrobný průběh výkonu je zobrazen v grafu 8.12, ze kterého jsou vidět meze výkonu od 1,724 MW do 2,535 MW, což odpovídá výkonovému rozsahu 0,811 MW. První působení dynamické regulace tzv. dopolední nastává v 5:55 a končí v 11:10. Druhý úsek dynamické regulace, tzv. večerní, začíná působit v 16:05 a končí ve 21:45. Ve výsledném průběhu se neseťká s velkými výkonovými změnami.



Graf. 8.12: Detail dodávaného výkonu s dynamickou regulací

## 8.5 Regulační výkon

Požadovaný regulační výkon, který reguluje výkon na konstantní hodnotu je zobrazen v grafu 8.11. Výkon má dva parabolické špičkové průběhy, které lze rozdělit na dopolední a večerní. Každý z nich se pohybuje v časovém rozmezí pěti hodin. Dopolední regulace výkonu začíná působit v 5:55 a končí v 11:10 hodin, maximálního výkonu 0,511 MW dosahuje v 8:10. Večerní regulace výkonu začíná působit v 16:05 a vypíná se ve 21:45, maxima (0,516 MW) dosahuje v 19:05.

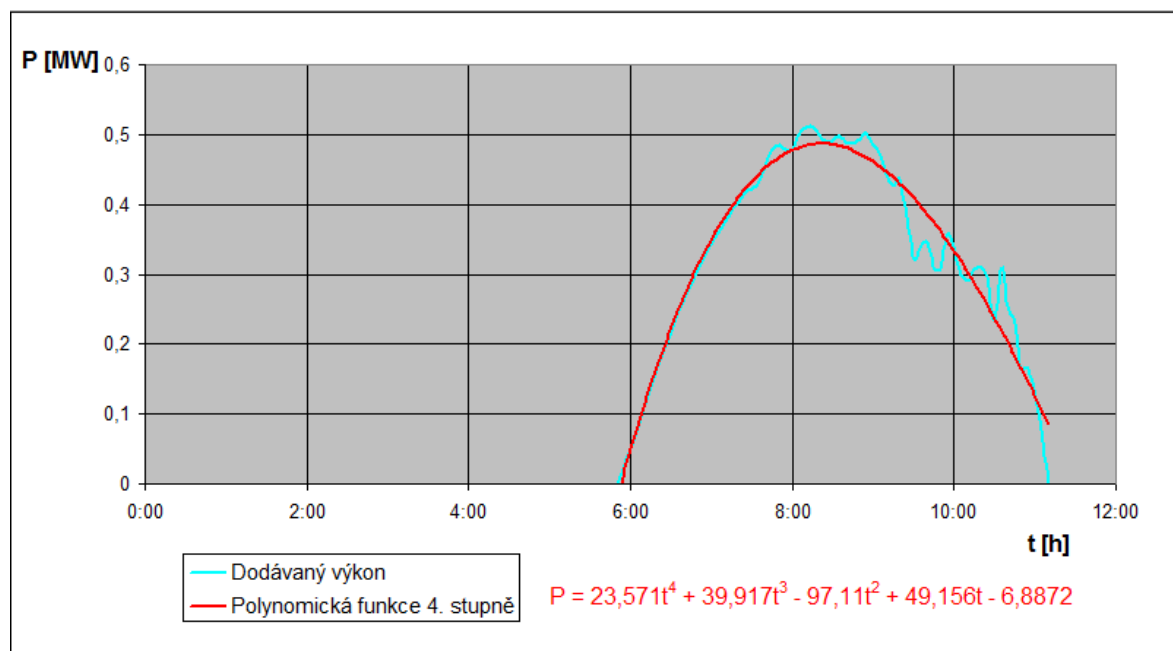
Při proložení grafu 8.11 vertikální osou procházející časem 13:40 je možné pozorovat, že dodávané výkony jsou téměř zrcadlově shodné k porovnávané fiktivní ose. V ranních a večerních hodinách je výkon velmi rovnoměrný, který je způsoben difúzní složkou světelného záření. Ta převládá nad přímým slunečním zářením. Pro vyhodnocení výkonu je průběh rozdělen na dopolední a večerní průběhy regulačního výkonu, které jsou zobrazeny v grafu 8.13 a 8.14.

### 8.5.1 Dopolední výkon

Detail potřebného výkonu v dopoledních hodinách je zobrazen v grafu 8.13. V první části grafu je průběh výkonu velmi pozvolný, téměř bez velkých změn. Naopak v druhé části průběhu je výkon s větší stochastikou. Průběh výkonu má téměř parabolický průběh, který byl proložen polynomem čtvrtého řádu. Rovnice popisující tuto rovnici je následující:

$$P = 23,571t^4 + 39,917t^3 - 97,11t^2 + 49,156t - 6,8872.$$

(8.2)



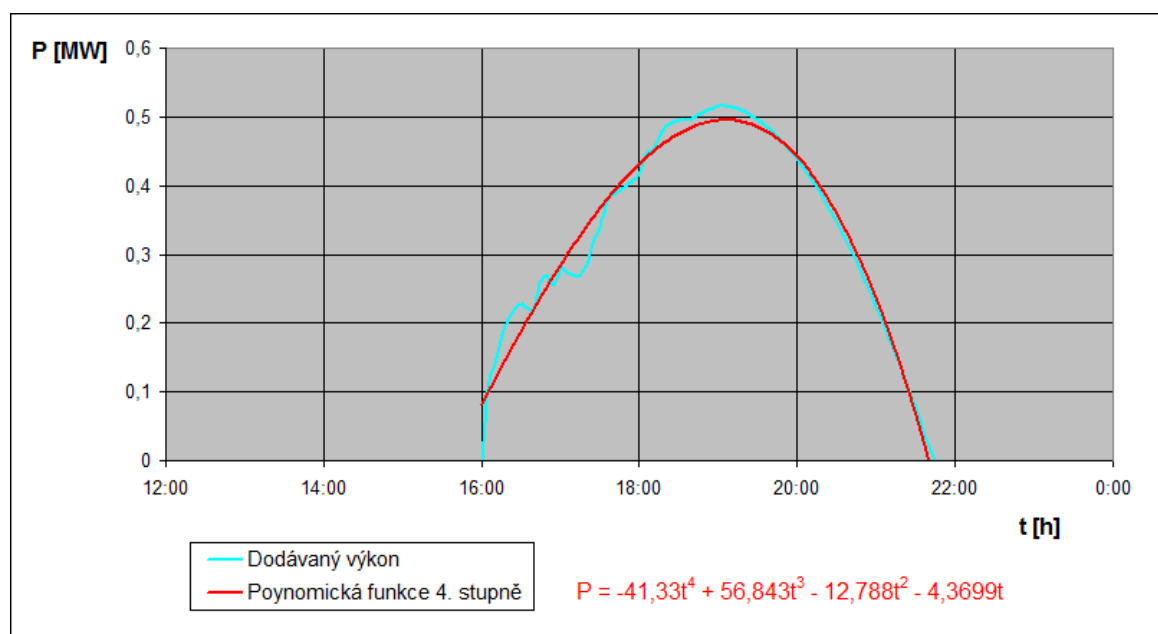
Graf. 8.13: Regulační výkon (dopolední špička)

### 8.5.2 Večerní výkon

Průběh večerního výkonu má také jako předchozí průběh, a to parabolický. V první části průběhu jsou změny ve výkonu větší než v první části. Průběh byl proložen také polynomem čtvrtého řádu,

$$P = -41,33t^4 + 56,843t^3 - 12,788t^2 - 4,3699t.$$

(8.3)



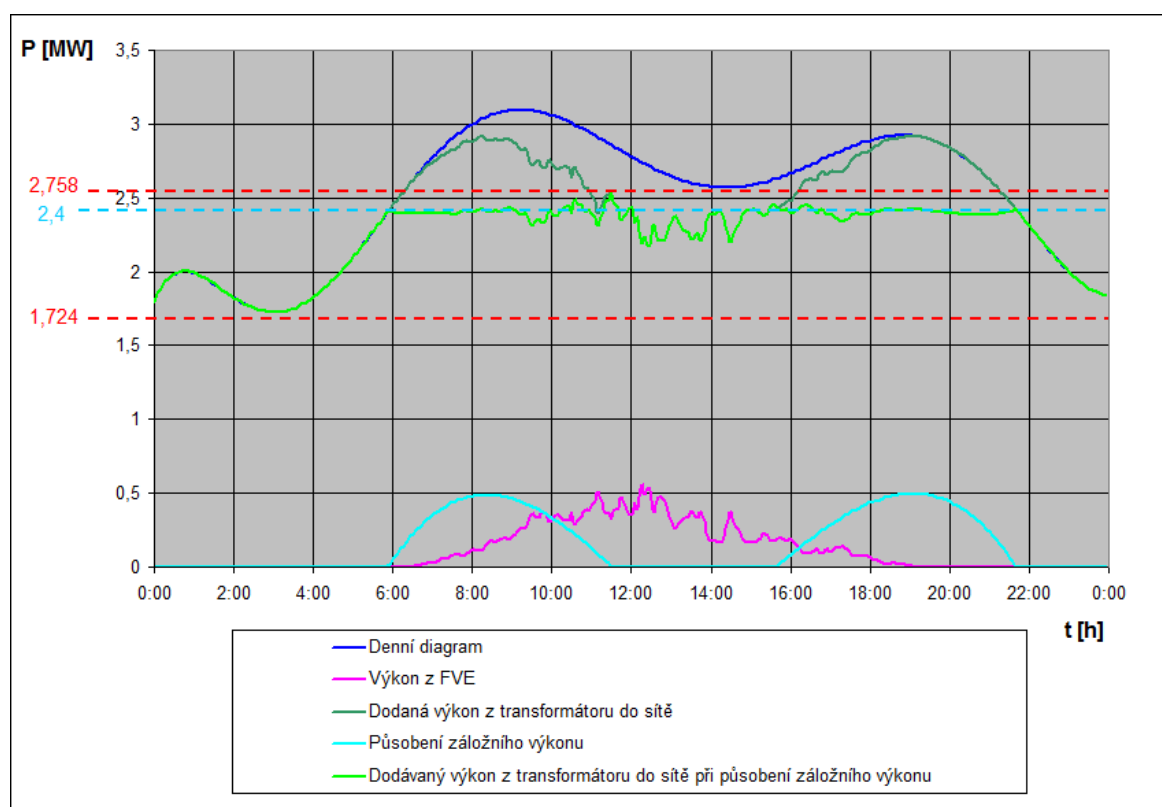
Graf. 8.14: Regulační výkon (odpolední špička)

## 8.6 Aplikace s pomocí matematických funkcí

Dynamická regulace je velmi zajímavá z pohledu konstantního výkonu, ale má velkou nevýhodu. Tou se stává průběh dodávaného výkonu ze záložního zdroje, který lze velmi těžko nastavit. Z toho důvodu byly vytvořeny funkce, které se snaží zjednodušit daný průběh pomocí matematické funkce. Tato funkce nepopisuje přesně požadovaný výkon, dochází zde k menším odchylkám.

Při aplikaci těchto funkcí do naměřených dat je možné pozorovat odchylky výkonu. Výsledné průběhy jsou zobrazeny v grafu 8.15. Z průběhů v grafu je vidět, že aplikováním matematických funkcí vznikají velmi malé odchylky. Tyto chyby nastávají v dopolední dodávce výkonu ve druhé části diagramu. Naopak ve večerním průběhu diagramu vznikají největší chyby v první polovině. Tyto chyby jsou způsobeny výkonem z FVE, které představují typickou krátkodobou stochastiku, neboli fotovoltaickou.

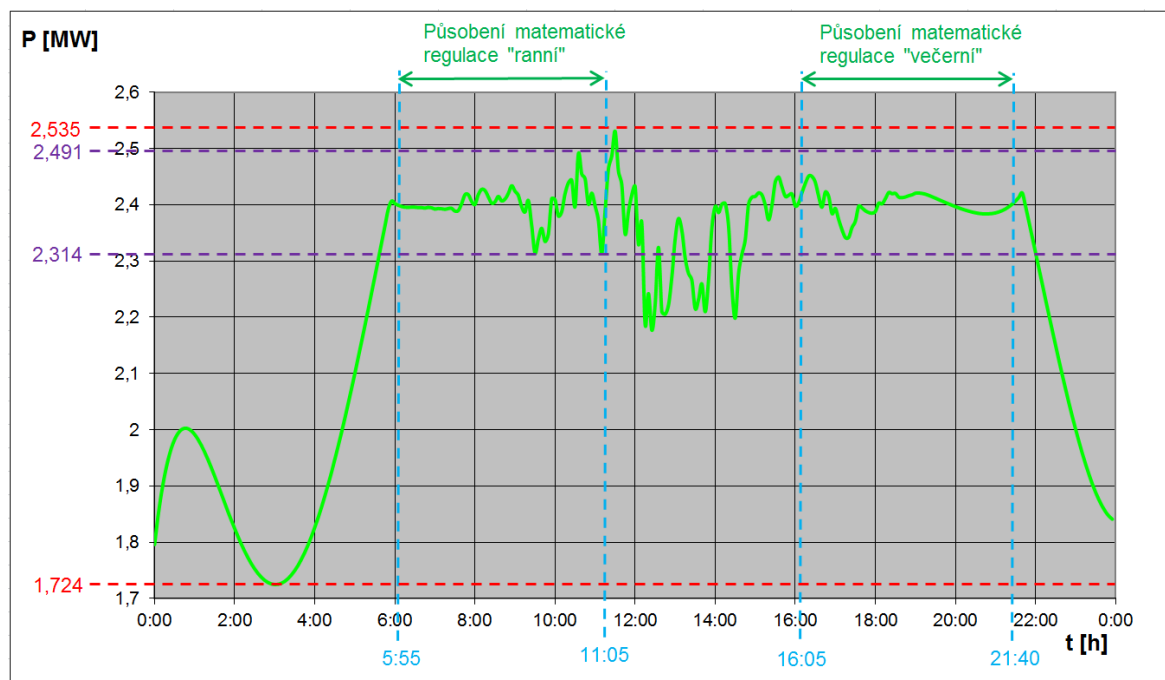
V částech, kde vznikají chyby spojené se stochastikou dodávaného výkonu, je obtížné přepokládat jejich náhlé změny výkonu. V porovnání těchto změn výkonu s poledními hodinami, tyto změny jsou velmi malé.



Graf. 8.15: Regulace dynamická pomocí matematické funkce

Detailní průběh výkonu je zobrazen v grafu 8.15. První regulace nastává v 5:55 a končí 11:05 a je označovaná jako dopolední. Druhá regulace pojmenovaná jako večerní začíná v 16:05 a končí ve 21:40. Chyba v regulaci za použití matematické funkce je v rozmezí 2,491 MW do 2,314 MW. Po vzájemném odečtení je tento rozdíl 0,177 MW. Největší změny jsou u ranní

regulace ve druhé polovině, u večerní regulace to je v první polovině. Tyto změny jsou způsobeny FVE, zejména přímým slunečním zářením, které převládá nad difúzním zářením.



Graf. 8.16: Detail dodávaného výkonu s matematickou regulací

## 8.7 Srovnání jednotlivých metod

Při srovnávání jednotlivých regulací by bylo jako nejlepší variantou, zvolit si úsek, ve kterém se bude regulovat, ovšem to je velký problém. Kupříkladu jednostupňová a vícestupňová regulace má velmi rozdílné časové úseky, které jsou závislé na velikosti regulačních stupňů. Dopolední regulace u jednostupňové regulace trvá 2 hodiny a 35 minut, naopak u dvoustupňové regulace trvá 5 hodin a 55 minut. Každá metoda má různé klady a zápory, ty jsou probrány v následujících odstavcích.

Regulace skoková „jednostupňová“ je velmi jednoduchá regulace, vyznačující se vysokou účinností při výrobě elektrické energie. Jednotka pracuje při jmenovitém výkonu (100 %). Naopak velkou nevýhodou jsou velké výkonové změny při spínání a vypínání regulačního výkonu.

Regulace skoková „dvoustupňová“ využívá ke své regulaci dvou regulačních stupňů. Při této regulaci dochází ke snížení účinnosti při výrobě elektrické energie. Za pomoci regulačních stupňů dochází ke snížení rozptylu výkonu.

Regulace skoková „vícestupňová“ řeší regulaci pomocí většího množství regulačních stupňů, které jsou spínány podle potřeby. U této metody dochází taktéž ke snížení účinnosti jako u předchozí metody. Při této metodě regulace docílíme k významnému vyregulování výkonu.



Regulace dynamická reguluje výkon na konstantní hodnotu. U této metody nenastávají změny ve výkonu. Tato metoda je velmi závislá na citlivosti regulátorů. Velmi pozvolný nárůst požadovaného výkonu je spojen s nízkou účinností jednotky vyrábějící elektrickou energii.

Aplikace matematických funkcí při regulaci z důvodu nastavení regulátoru byla vytvořena matematická funkce (polynom čtvrtého řádu), která popisuje požadovaný výkon. Tato metoda pracuje s větší odchylkou výkonu než dynamické regulace. Matematická funkce není schopná úplně přesně proložit požadovaný průběh výkonu, a tím dochází k chybám.

Pro názornost byla vytvořena tabulka 8.1, ve které jsou zhodnoceny jednotlivé regulace z hlediska spotřebovaného výkonu a rozsahu vyregulování. Z tabulky vyplývá, že největší spotřebovaný výkon má víceúrovňová regulace a to 8,675 MWh. Naopak nejmenší spotřebovaný výkon má dynamická regulace, a to 3,671 MWh. Při hodnocení z hlediska rozsahu vyregulování dopadla taktéž dynamická regulace, která pracuje s konstantní hodnotou. Naopak nejhůře dopadla skoková jednorázová regulace, a to 1,032 MW.

Regulace	Spotřebovaný výkon	Stupeň regulace
	[MWh]	[MW]
Skoková 1 MW	5,833	1,032
Skoková 1 MW, 0,5 MW	8,500	0,522
Skoková 0,8 MW, 0,7 MW, 0,6 MW, 0,5 MW	8,675	0,302
Dynamická (na konstantní hodnotu)	3,671	0
Dynamická (s pomocí matematické funkce)	3,703	0,177

*Tab. 8.1: Srovnání jednotlivých regulací*

## 9. Závěr

Postupný rozvoj obnovitelných zdrojů způsobuje velmi různé problémy, a to od problémů ekonomických až po ty technické. V ČR představují největší zastoupení z pohledu obnovitelných zdrojů fotovoltaické elektrárny, které mají velký vliv na naši elektrizační soustavu.

Solární elektrárna má velmi proměnný výkon v závislosti na čase, ve srovnání s větrnou elektrárnou. Solární elektrárna je ovlivňována ročním a denním cyklem. Naopak větrné elektrárny nejsou závislé na těchto cyklech, ale závisí pouze na rychlosti větru. Každý z těchto zdrojů má své pro a proti. Velmi zajímavých výsledků lze docílit vzájemnou kombinací těchto zdrojů, kdy současně využíváme solární a větrnou elektrárnu. Při vzájemné spolupráci jsme schopni docílit lepších výsledků. V zimním období, kdy je nedostatek slunečního svitu, je možno poskytovat výkon z větrné elektrárny. Toho lze využívat i v nočních hodinách, kdy fotovoltaická elektrárna není v provozu. Podmínkou pro využití těchto zdrojů je vyhovující lokalita, která musí mít vysoké sluneční záření a rychlost větru. U nás těmto podmínkám vyhovuje pouze oblast Vysočina.

Většinou se ale setkáváme se zdrojem jednoho typu. Pro ten je nutné najít zdroj, který by vyrovnával dodávku chybějícího zdroje. Při volbě tohoto zdroje byl zvolen jako zdroj biomasy, a to pro své zařazení v kategorii obnovitelných zdrojů. Zde byly zhodnoceny jednotlivé metody technologie z biomasy k výrobě elektrické energie. Nejlépe těmto požadavkům vyhověla bioplynová elektrárna, která produkuje bioplyn a ten je následně zpracováván v kogenerační jednotce. Bioplynové stanice uvedené do provozu po 1. lednu 2012 jsou nuceny využívat vyrobené teplo, a to minimálně v úrovni 10 % vůči vyrobené elektřině v daném roce. To je zároveň i podmínkou pro poskytnutí finanční podpory k výstavbě tohoto zdroje. Získané teplo z kogenerační jednotky je možno využívat k mnoha účelům. Prvním a často používaným je ohřev vody, která se může využívat k vytápění, nebo ohřevu TUV. V zimním období je možno využívat teplo k výrobě chladu pomocí absorpčních jednotek.

Při realizaci takovéto spolupráce je nutno vytvořit si regulační schéma, podle kterého se bude řídit dodávaný výkon. V této práci bylo vytvořeno regulační schéma pro spolupráci fotovoltaické elektrárny s bioplynovou stanicí, kde jsou popsány jednotlivé podmínky pro vzájemnou spolupráci těchto zdrojů.

Poslední část této práce pracuje s reálnými hodnotami, které byly změřeny na fotovoltaické elektrárně pracující do distribuční sítě. Tyto naměřené hodnoty byly zpracovány za pomoci programu Microsoft Office Excel. Na těchto hodnotách byly provedeny simulace z pohledu dodávaného výkonu v období velké spotřeby. Byly provedeny různé metody regulace, které jsou: jednostupňová, dvoustupňová, vícestupňová, dynamická a pomocí matematické funkce.

Jednostupňová regulace se vyznačuje svoji jednoduchostí z pohledu řízení výkonu, za pomoci této metody nejsme schopni plynule vyregulovat danou spotřebu.

Jako další metoda, která řeší regulaci je dvoustupňová regulace. Ve srovnání s jednostupňovou regulací je dvou-stupňová regulace o něco lepší z pohledu regulace výkonu. Dvou-

stupňová regulace využívá spínání plného a polovičního výkonu. Tato metoda je z pohledu řízení o něco složitější, naopak při ní nevznikají velké výkonové změny, které mohou ovlivňovat elektrizační soustavu. Dvoustupňová regulace není tak úplně ideální, a právě proto byla provedena simulace s vícestupňovou regulací. Ta využívá pro svoji práci více stupňů, které jsou postupně podle potřeby spínány. Touto regulací se docílilo lepšího vyregulování sítě. Nejlepší metodou z pohledu sítě je dynamická regulace. Dodávaný výkon se udržuje na konstantní hodnotě podle spotřeby odebíraného výkonu. Velkou nevýhodou je, že tato metoda musí spínat už při malých odchylkách a tím je nucena jednotka (spalovací motor) pracovat pod 50% jmenovitého výkonu a s tím významně i klesá účinnost. Dynamická regulace se vyznačuje velmi proměnnými změnami z pohledu času. Proto vznikla metoda, která využívá matematických funkcí. Ta zejména spočívá v tom, že dodávaný výkon je proložen polynomem čtvrtého řádu při aplikaci tohoto výkonu jako zdroje. Nedocílíme takového vyregulování jako u dynamické regulace, ale ve srovnání s jednostupňovou regulací je to zanedbatelné.

Tyto regulace je možno hodnotit podle několika hledisek. Metody byly srovnávány z hlediska spotřebovaného výkonu pro danou regulaci a stupněm vyregulování. Při srovnávání jednotlivých metod bylo zjištěno, že dynamická regulace je nejlepší ze všech porovnávaných metod. Má nejmenší spotřebu dodávaného výkonu (3,671 MWh) a je schopna udržet výkon v síti na konstantní hodnotě. Naopak nejhůře dopadla z hlediska množství dodaného výkonu vícestupňová regulace a to 8,675 MWh. Z rozsahu vyregulování nejhůře dopadla jednostupňová regulace s výkonovým rozsahem regulace 1,032 MW. Pomocí těchto regulací je možno dosáhnout lepší stability sítě, kdy za pomoci biomasy snižujeme velké odběrové špičky v síti.

## Použitá literatura

- [1] Nationmaster. Darrieus wind turbine. [online, cit. 7. 4. 2013]. Dostupné z WWW:< <http://www.nationmaster.com/encyclopedia/Darrieus-wind-turbine>>.
- [2] Mastný, P., Drápela, J., Mišák, S., Macháček, J., Ptáček, M., Radil, L., Bartošík, T., Pavelka, T., Obnovitelné zdroje elektrické energie. České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04937-2.
- [3] Mastný, P., Studijní podklady předmětu Malé zdroje elektrické energie, 2011, Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [4] WIKIPEDIA. Darrieus [online, cit. 7. 4. 2013]. Dostupné z WWW:< <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darrieus.jpg>>.
- [5] BERANOVSKÝ, J. – TRUXA, J. Alternativní energie pro váš dům. 1. vyd. EkoWATT o.s., ERA, 2003. 125 s. ISBN 80-86517-59-4
- [6] JANÍČEK, F. Obnovitelné zdroje energie 1. 2. vydání. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009. 169 s. ISB 978-80-89402-04-5.
- [7] Kolektiv autorů, Navrhování a projektování fotovoltaických elektráren, Odborný seminář ČKAIT, Czech RE Agency, 2008, FEI ČVUT Praha
- [8] MASTNÝ, P. Obnovitelné zdroje elektrické energie. 1. vyd. ČVUT Praha, 2011. 256 s. ISB 978-80-01-04937-2
- [9] Tzb 2009. Solární články z krystalického křemíku - základní technologie současné fotovoltaiky [online, cit. 7. 4. 2013]. Dostupné z WWW: < <http://www.tzb-info.cz/3553-solarni-clanky-z-krystalickeho-kremiku-zakladni-technologie-soucasne-fotovoltaiky>>.
- [10] Odborné časopisy. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. [online, cit. 7. 4. 2013]. Dostupné z WWW: < <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40646.pdf>>.
- [11] WIKIPEDIA. Stochastický. [online, cit. 7. 4. 2013]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Stochastick%C3%BD>>.
- [12] WIKIPEDIA. Koeficient. [online, cit. 7. 4. 2013]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Koeficient\\_ro%C4%8Dn%C3%ADho\\_vyu%C5%BEit%C3%AD](http://cs.wikipedia.org/wiki/Koeficient_ro%C4%8Dn%C3%ADho_vyu%C5%BEit%C3%AD)>.

- [13] ČAMBALA, P. – MACENAUER, M. – MENDL, T. – ŠPAČEK, T. Modelování provozu OZE v rámci ES ČR. International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012; (EPE 2012), 2012.
- [14] HRADÍLEK, Z. – ŠUMBEA, T. Simulator for Prediction of Energy Obtained from Wind Power Plants. International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011; (EPE 2011), 2011.
- [15] ŠKORPIL, J. Obnovitelné zdroje a jejich začlenění do energetických systémů. 1. vyd. Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISB 978-80-7043-7339-9.
- [16] RUSEK. Řízení elektrizačních soustav. Studijní materiály VŠB – TU Ostrava.
- [17] ČEPS. [online, cit. 7. 4. 2013].  
Dostupné z WWW: <[www.ceps.cz/CZE/Stranky/default.aspx](http://www.ceps.cz/CZE/Stranky/default.aspx)>.
- [18] HEINZ, S., BARBARA, E., Bioplyn v praxi, HEL, 2004.166 s.
- [19] Eurosolar. Od bioenergeticky zásobované vesnice k regionu:koncept [online, cit. 7. 4. 2013]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.eurosolar.cz/phprs/rservice.php?akce=tisk&cislocclanku=2009040001>>.
- [20] HRADÍLEK, Z. Elektroenergetika průmyslových a distribučních zařízení. 1. vyd. VŠB-TU Ostrava, 2008. ISB 978-80-7225-291-6.
- [21] SMOČEK, M. – HRADÍLEK, Z. Photovoltaic Power Plants, Extreme Change at Power Difference International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013; TU-Košice, Slovakia 2013.

## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Princip vzniku větru [1] .....	2
Obr. 2.2: Průměrné roční rychlosti větru na jednotlivá místa v ČR [3] .....	3
Obr. 2.3: Savoniův větrný motor .....	7
Obr. 2.4: Vztlakové motory a) jednobídné, b) dvoubídné a c) třídné provedení [3] .....	8
Obr. 2.5.: Větrný motor Darrieus [4] .....	8
Obr. 2.6: Zapojení malé větrné elektrárny do distribuční sítě .....	9
Obr. 2.7: Zapojení asynchronního generátoru s napájením do rotoru [2] .....	10
Obr. 2.8: Zapojení synchronního generátoru poháněného přímo turbínou [2] .....	10
Obr. 2.9: Princip přímé přeměny energie slunečního záření na elektrickou s využitím fotoelektrického jevu [2] .....	14
Obr. 2.10: Princip fotovoltaického jevu [2] .....	15
Obr. 2.11: Náhradní schéma fotovoltaického článku [7] .....	16
Obr. 2.12: Schéma křemíkového PV článku [9] .....	17
Obr. 2.13: Schéma konstrukce PV panelu [9] .....	18
Obr. 3.1 Krátkodobá charakteristika .....	20
Obr. 3.2: Pozvolná charakteristika .....	21
Obr. 3.3: Dlouhodobá charakteristika .....	21
Obr. 4.1: Denní akumulace v simulačním systému [13] .....	26
Obr. 6.1: Výroba elektrické energie z OZE [10] .....	32
Obr. 6.2: Anaerobní fermentace .....	35
Obr. 6.3: Výroba elektrické energie z biomasy .....	36
Obr. 7.1: Výroba elektrické energie z biomasy .....	39
Obr 8.1: Zapojení FVE do distribuční sítě .....	40
Obr 8.2: Zapojení FVE do distribuční sítě .....	44

## Seznam grafů

Graf. 2.1: Závislost výkonu větru na jeho rychlosti .....	6
Graf. 8.1: Průběh denního diagramu .....	41
Graf. 8.2: Průběh průměrného výkonu z FVE.....	42
Graf. 8.3: Průběh denního diagramu při dodávce z FVE .....	43
Graf. 8.4: Skoková regulace plným výkonem 1 MW.....	45
Graf. 8.5: Detail dodávaného výkonu s jednostupňovou regulací (1 MW).....	46
Graf. 8.6: Skoková regulace dvoustupňová, výkonem 0,5 MW a 1 MW .....	47
Graf. 8.7: Detail dodávaného výkonu s dvoustupňovou regulací (1 MW a 0,5 MW) .	48
Graf. 8.8: Skoková regulace vícestupňová .....	49
Graf. 8.9: Detail dodávaného výkonu s vícestupňovou regulací od 0:00 do 12:00.....	50
Graf. 8.10: Detail dodávaného výkonu s vícestupňovou regulací od 12:00 do 0:00....	51
Graf. 8.11: Regulace dynamická .....	52
Graf. 8.12: Detail dodávaného výkonu s dynamickou regulací .....	53
Graf. 8.13: Regulační výkon (dopolední špička) .....	54
Graf. 8.14: Regulační výkon (odpolední špička) .....	54
Graf. 8.15: Regulace dynamická pomocí matematické funkce .....	55
Graf. 8.16: Detail dodávaného výkonu s matematickou regulací .....	56

## Seznam tabulek

Tab. 2.1: Typy povrchů .....	3
Tab. 4.1: Technologie akumulace elektrické energie [13] .....	23
Tab. 8.1: Srovnání jednotlivých regulací .....	57